

TARTU ÜLIKOOL
Füüsika Instituut
Füüsikalise optika labor

BAKALAUREUSETÖÖ (12 EAP) - FÜÜSIKA ERIALA

Ruumilise valgusvälja modulaatori faasikoste määramine suure ruumilise lahutusega

Autorid:
Jaan KASAK

Juhendajad:
Andreas VALDMANN
Sandhra-Mirella VALDMA



2018

Ruumilise valgusvälja modulaatori faasikoste määramine suure ruumilise lahutusega

Ruumilised valgusvälja modulaatorid (SLMid) on levinud optoelektronilised seadmed, millega moduleeritakse kasutaja tahte järgi ruumis valguse amplituudi või faasi. SLMi kasutamine eeldab tema sisendsignaali ja väljundi seose ehk tema koste tundmist. Koste täpne määramine on oluline täpsust nõudvates rakendustes, näiteks holograafias ja optilistes arvutites. Ilmneb, et SLMi faasikostel on ruumiline sõltuvus, kus mingi sisendsignaali rakendamine ühes SLMi piirkonnas ei tagasta sama väljundsignaali kui sama sisendi rakendamine teises SLMi piirkonnas. Määrame modulaatori faasikoste uue tehnikaga, mis on kiirem ja mugavam kui kirjanduses kasutatud ning pakub eeliseid ka andmetöötluses. Tehnikaga demonstreerime eeliseid ruumilise sõltuvusega faasikostega arvestamisel ning lisame kasutatava tehnika võimalusi edasisteks töödeks.

CERCS: P200 Elektromagnetism, optika, akustika

Märksõnad: Ruumiline valgusvälja modulaator, faasikoste, kaliibrimine

Determination of the phase response of a spatial light modulator with large spatial resolution

Spatial Light Modulators (SLMs) are widely used optoelectronic devices which can spatially modulate the amplitude and phase of incident light at the users behest. Useage of an SLM requires knowledge of the relationship between the input signal of an SLM and the output, the phase response of the SLM. The exact determination of the phase response is important in percise applications such as holography or optical computing. The phase response of the SLM is spatially varying, an input signal applied to different areas of the SLM can give different outputs. We determine the phase response with a new method which is faster and easier to use than previous attempts and offers more flexibility in data analysis. With this method we demonstrate the benefits of accounting for the spatially varying phase response and add sugestions for future work on this method.

CERCS: P200 Electromagnetism, optics, acoustics

Keywords: Spatial light modulator, phase response, calibration

Sisukord

Sissejuhatus	1
1 Teoreetilised alused	3
1.1 Ruumilise valgusvälja modulaatori ehitus ja tööpõhimõte	3
1.1.1 Vedelkristallid	4
1.1.2 SLMi faasikostet mõjutavad tegurid	6
1.2 SLMi kaliibrimistehnikad	8
1.2.1 Kaliibrimine intensiivsuskostega	8
1.2.2 Kaliibrimine interferomeetriga	13
1.2.3 Aberratsioonide mõju kaliibrimismeetoditele	15
1.3 Faasihologrammid	15
2 Meetodid	17
2.1 Tähtsamad optilise skeemi elemendid	17
2.2 Difraktsioonivõre efektiivsuse mõõtmine ruumilise lahutusega	18
2.2.1 Kasutatava meetodi võrdlus teiste kaliibrimistehnikatega	19
2.3 Kaliibrimisprotsess	21
2.3.1 Kaliibrimine	21
2.3.2 Andmetöötlus	21
2.3.3 Kaliibrimise tulemuste hindamine	23
3 Tulemused	25
3.1 Arvutatud faasikoste	25
3.2 Polünoomi määramine	27
3.3 Teiskordne kaliibrimine	30
3.4 Faasihologrammide kuvamine	32
Kokkuvõte	34
Kirjandus	35
Lihtlitsents	37

Sissejuhatus

Kaasaegsetes optilistes lahendustes on valgus tihti infokandja või infotöötluste keskkond. Näiteks projektori sees on valge valgusallikas, mille valgust on vaja saada edastama arvutist tulevat videosignaali. Sellistel juhtudel on vaja seadmeid, mis suudaksid valgust mingisuguse sisendsignaali järgi moduleerida. Ruumiline valgusvälja modulaator (*Spatial Light Modulator* - SLM) on optoelektroniline seade, millega on võimalik laia valgusvihu eri ruumpunktides määrata valguse amplituudi või faasi. Sarnaselt arvutikuvaritele ja televiisoritele koosneb SLMi aktiivne pind pikslitest, mille parameetreid on võimalik arvutiga eraldi kontrollida. Lisaks projektoritele on taolised seadmed laialdaselt kasutusel holograafia rakendustes ning ka põhikomponendina süsteemides, mida kasutatakse tööstuses ja militaarrakendustes väga kiireks piltide ja mustrite tuvastamiseks. Hiljutises teadustöös leiavad SLMid kasutust ühe-pikslilise anduriga ruumilise info taastamises ja kujutamises läbi hajutavate pindade [1].

SLMi efektiivseks kasutamiseks on vajalik teada seost selle sisendsignaali ja väljundi vahel, ehk tema kostet. SLMi väljundiks on olenevalt selle ehitusest teda läbinud või temalt peegeldunud valgus, mida on sisendsignaali järgi moduleeritud. Sisendsignaaliks on SLMi pikslite arvule vastava suurusega halltoonidest pilt, mille iga piksli väärtusega adresseeritakse vastavat pikslit SLMi pinnal. Faasikoste määratakse seadet kaliibrides.

Sageli kaliibritakse SLM tehases, kuid tihti eeldatakse et kõik selle pikslid käituvad ühtemoodi ning leitud koste ei arvesta SLMi ruumilise struktuuriga. Selgub, et SLMi faasikoste on ruumilise sõltuvusega, ehk otsitava faasikoste kuju on erinev erinevates SLMi piirkondades. Varem on ruumilise sõltuvusega faasikostet leitud Twyman-Green interferomeetriga [2], Mach-Zehnder interferomeetriga [3] ning intensiivsuskoste kaudu [4].

Käesolevas töö eesmärgiks on uut kaliibrimistehnikat kasutades määrata SLMi faasikoste suure ruumilise lahutusega. Täpselt määratud faasikostega SLM on igas kasutusvaldkonnas edukam kui täpselt määramata kostega seade. Näiteks projektorites ja virtuaalreaalsuse seadmetes on lõpptulemuse pilt teravam ja selgem ning korrelaatorid suudavad

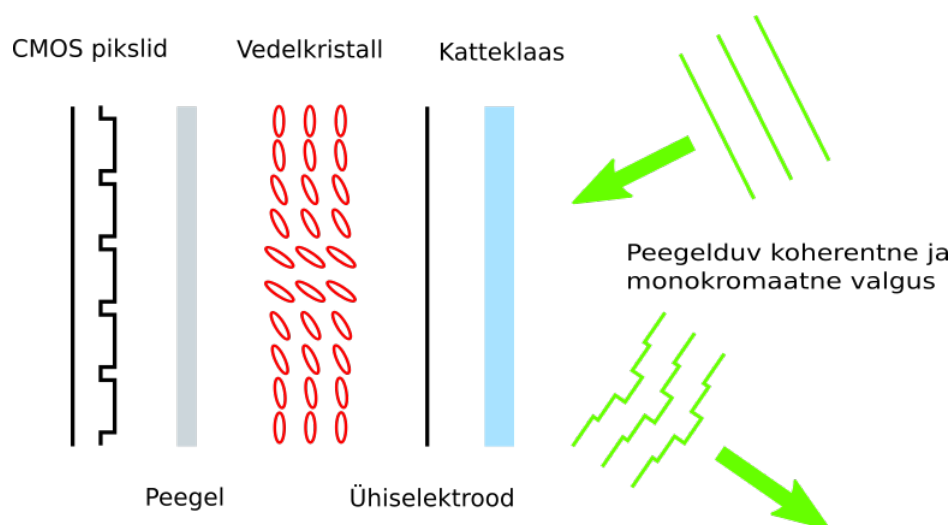
täpsemini määrata otsitava kuju või mustri asukoha sisendpildil. Läbi hajutavate pindade objekte kujutades on samuti võimalik kontrastsemaid pilte saada, kuna hajutava pinna tekitatud lainetasandi faasimodulatsioon kompenseeritakse palju täpsemini. Tutvustatav meetod on kergesti kasutatav olemasolevas SLMi rakendavas optilises skeemis, tehes kalibrimise enne mõõtmise sooritamist palju mugavamaks ning ka kiiremaks. Kalibrimist on võimalik ka arvutiprogrammiga automatiseerida ning kalibrimisprotsess ise võtab vähe aega.

Töös tutvustame esmalt SLMi tööpõhimõtet ja kirjanduses eelnevalt kasutatud kalibrimistehnikaid, edasi kirjutame uuest meetodist ning demonstreerime tulemuste peatükis eelised faasikoste ruumilise sõltuvusega arvestamisel.

1 Teoreetilised alused

Käesolevas peatükis anname ülevaate SLMide ehituse ja nende kaliibrimise tehnilistest alustest. Kirjeldame valguse faasi moduleerivate SLMide põhikomponendi vedelkristallidega seotud füüsikat. Seejärel esitame ülevaate SLMi faasikostet mõjutavatest teguritest ning kaliibrimismeetoditest koos vajaliku laineoptika teooriaga. Viimasena käsitleme tehnikaid kaliibrimismeetodi edukuse hindamiseks.

1.1 Ruumilise valgusvälja modulaatori ehitus ja tööpõhimõte



JOONIS 1.1: Valguse moduleerimine SLMilt peegeldudes koos tüüpilise SLMi ehitusega.

Käsitleme peegeldavas režiimis töötavaid modulaatoreid, mille ehitus erineb läbilaskvatest (*transmissive*) tüüpi modulaatoritest. Peegeldava SLMi aktiivne ehk modulatsiooni läbi viiv ala on mitmekihilise ehitusega. Põhja moodustab ränikiip, mille peal on pikslite maatriks. Pikslid katab õhuke dielektrikust peegel ja vedelkristalli kiht. Vedelkristalli peal on pikslite ühiselektrood ja kaitsev katteklaas. Moduleerimist võimaldab vedelkristalli kiht, mille optilised omadused muutuvad elektriväljas. Tüüpiliselt on SLM ühendatud arvutiga videokaabliga (VGA, DVI, HDMI) [5, 6], mille kaudu saadetakse modulaatorile kuvamiseks faasimaske. Faasimaskid on 8-bitise sügavusega, mis tähendab et maski

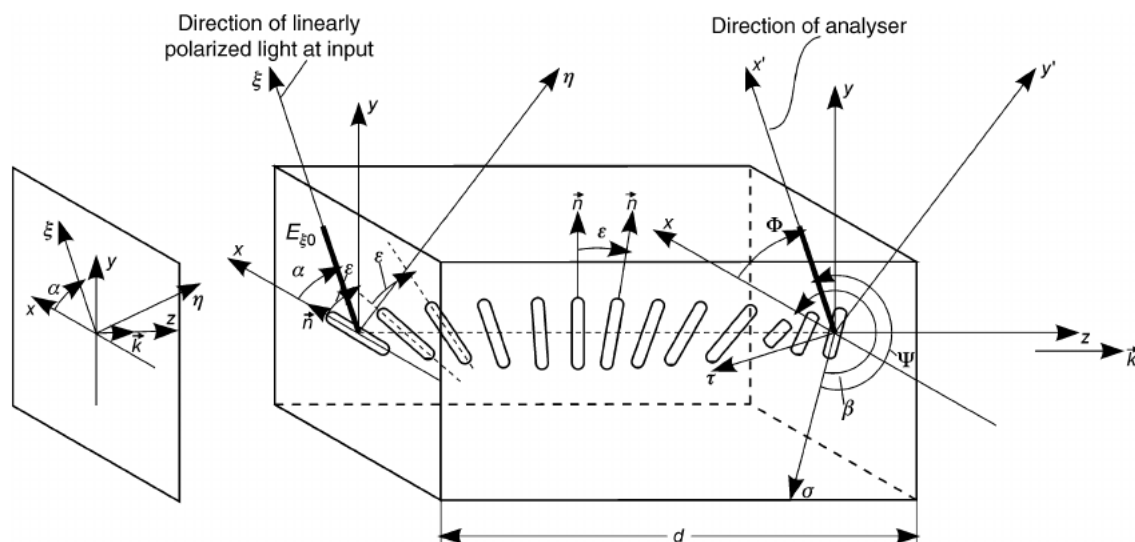
moodustavad täisarvulised halltoonid on vahemikus 0-255. Iga nendest halltoonidest teisendatakse pinge väärtuseks, mida SLM rakendab vastava asukohaga pikslile ränikiibil. Pinge rakendamisest tekkiva vedelkristalli kihti läbiva elektrivälja tugevus on võrdelises seoses rakendatud pingega, suuremale pingele vastab tugevam elektriväli. Elektrivälja mõjul muudavad vedelkristalli molekulid oma orientatsiooni ja aine optilised omadused muutuvad [7]. Olulisim muutus on vedelkristalli aine efektiivse murdumisnäitaja muut, mida saab faasimaski vastavate pikslite väärtuste järgi muuta kogu modulaatori pinnal. Kuna erinevatele murdumisnäitajatele vastab erinev optiline käiguvahe erinevate modulaatori pikslite juures, siis peegeldunud valgusele on võimalik anda kasutaja tahte järgi üle modulaatori pinna erinev faasinihe. Järgnevana kirjeldame vedelkristalliga kui olulisima komponendiga seotud füüsikat.

1.1.1 Vedelkristallid

Vedelkristallid on osakorrastusega molekulaarsüsteemid, neid võib käsitleda kui vahefaase isotroopse vedeliku ja kolmemõõtmelise nihkesümmeetriaga kristallide vahel. Vedelkristallid on termotroopsed, ehk nende korrastatuse aste sõltub temperatuurist. Kõrgematel temperatuuridel on vedelkristallide füüsikalised omadused sarnased isotroopsele vedelikule, kuigi ainet moodustavad molekulid on üksi tugevalt anisotroopsed. Ainet jahutades hakkavad ilmnenema korrastatuse olekud, algselt suunaline ja edasi jahtudes ruumiline. Vedelkristalle liigitatakse korrastatuse järgi smektikuteks, nemaatikuteks ja kiraalseteks. Käesolevas töös huvitavad meid nemaatikud, mis on enimlevinud tehnoloogia vedelkristallkuvarite ehituses [7–9].

Valguse levimine nemaatikutes

Nemaatikud on termotroopsete vedelkristallide vahefaas, mida iseloomustab orientatsioonilise korrastatuse olemasolu ja positsioonilise korrastatuse puudumine. Aine ei ole kristallile sarnaselt kihtidesse pakitud, kuid molekulidel on keskmine eelistatud suund, millele vastav vektor on vedelkristalli direktor \vec{n} . Nemaatikute molekulid on vardakujulised ja on elektrilised dipoolid. Selle tõttu paiknevad nad elektriväljas ümber piki välja jõujooni [9].



JOONIS 1.2: Lineaarselt polariseeritud valgus läbimas pööratud nemaatilist vedelkristalli pöördenurgaga β [8]. Valguse polarisatsiooniolekut pööratakse β võrra.

SLMis paikneb vedelkristall kihina tagapinna dielektrikust peegli ja katteklaasi vahel. Vedelkristalli kiht on kas homogeenne või pööratud (*twisted*). Mõlemal juhul on direktori suund välise elektrivälja puudumisel paralleelne pinna tasanditega. Homogeenses vedelkristallis on direktori suund püsiv läbi kogu aine. See vastandub pööratud nemaatikuga, kus vedelkristalli kihi ülemise pinna lähedal on molekulide direktor mingi nurga β all alumise pinna lähedal asuvate molekulide direktorite suhtes, kusjuures kahe pinna vahel toimub direktori suuna üleminek sujuvas spiraalis. Nurga β kutsutakse pöördenurgaks (*twist angle*). Ülemisi ja alumisi tasandeid fikseerib kristallist joondamiskiht.

Vedelkristallide molekulaarse struktuuri ja molekulide anisotroopsuse tõttu ilmnevad aines kaksikmurdivuse ja polarisatsiooniga seotud nähtused. Nemaatik käitub kui polariisaator, mille läbilaskvustelg on määratud vedelkristalli direktoriga. Kui pealse pinna direktori sihis lineaarselt polariseeritud valgus läbib pööratud nemaatikut, siis direktori sihi muutus ainet läbides pöörab polarisatsiooniolekut pöördenurga β võrra.

Vedelkristallis on murdumisnäitaja erinevus tavalise (n_o) ja ebatavalise (n_e) kiire jaoks on tüüpiliselt 0,1-0,2 [7] ja kutsutakse kaksikmurdivuseks. Elektrivälja rakendamisel pöörab direktor \vec{n} ümber elektrivälja jõujoonte sihiliseks vedelkristalli pindadega risti. Seega

paiknevad ümber ka kõikide molekulide optilised teljed ning vedelkristalli läbivale valgusele mõjub sõltuvalt elektrivälja tugevusest ja sellega kaasnevast direktori ümberorienteerumise määrast erineva murdumisnäitaja. Selle efekti ärakasutamine lubab rakendada vedelkristalle faasimodulatsiooni seadmetes. Pööratud nemaatikut läbiva monokromaatse valguse ühe polarisatsioonikomponendi faasinihe on antud kujul

$$\Delta\phi = 2k \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} [n(z) - n_e] dz + \langle\Delta\phi\rangle_{\text{soojuslik}}, \quad (1.1)$$

kus integraali kordajas on lainearv k , d on vedelkristalli kihi paksus, $n(z)$ on murdumisnäitaja sõltuvus sügavusest kihis, mis varieerub vahemikus n_o kuni n_e ja $\langle\Delta\phi\rangle_{\text{soojuslik}}$ on täiendav faasinihe, mis tekib soojusliikumisest vedelkristallis. Soojusliikumisest tekkinud faasinihe on suurusjärgus $1, 7 \times 10^{-7}$ radiaani [7] ja ei ole oluline. Faasinihke integraal on kahega korrutatud, kuna peegeldavas SLMis läbib valgus vedelkristalli kihti kaks korda.

1.1.2 SLMi faasikostet mõjutavad tegurid

SLMi faasikostet ehk tema seost sisendpildi halltooni ja modulaatorit läbinud valguses tekkiva faasinihke vahel mõjutavad nii SLMi enda ehitus kui ka faasimodulatsiooni võimaldava vedelkristalli kihi omadused. Efektiivne kaliibrimismeetod peab nendega arvestama ja võimalusel neid kompenseerima.

Tootmistehnikate piirangud

Modulaatori aktiivse pinna erinevad kihid ei ole tootmistehnikate piirangute tõttu kogumalas tasased [4]. Tagumisel peeglil või vahepealsetel kihtidel võib esineda nõgusus või kumerus, millest tulenevalt on ka nende kihtide vahel paiknev vedelkristalli kiht eri kohtades eri paksusega. Juba see asjaolu muudab valemis 1.1 kihi paksuse d avaldise, kus peab arvestama paksuse ruumilise sõltuvusega $d(x, y)$. Faasimoonutused, mis tulenevad vedelkristalli kihi paksuse erinevustest, on staatilised ning valemi 1.1 järgi sõltuvad kasutatava koherentse ja monokromaatse valguse lainepikkusest λ , kuid mitte SLMile kuvatava faasimaski kujust.

Pingestusskeem

Modulaatori pikselelektroode pingestatakse vahelduvvooluga. Oluline on, et keskmine pinge vedelkristallil oleks ajas null. Vastasel juhul võivad vedelkristalli molekulid omandada uue vaikumisi eelistatud orientatsiooni ning faasikoste ei meenuta enam varasemat, kusjuures faasimodulatsiooni vahemik $0 - 2\pi$ ei pruugi olla enam saavutatav. Faasimoonutuse võib lisada ka adresseerivata signaali rakendamine modulaatori aktiivsel pinnal. Näiteks kui piksleid ja maatriksi ridasi pingestatakse järjestikus ning seega rakendub soovitatav pinge eri modulaatori piirkondades eri aegadel [4].

Pinge rakendamisel piksli elektroodile ei teki elektriväli vaid piksli elektroodi ja ühis-elektroodi vahel vaid ka nõrgemana pikslite vahelises alas. See võib probleemiks osutada juhtudel kus SLMile kuvatav faasimask on väga kontrastne, ehk halltoonide muut on mingis piirkonnas väga järsk. Siis võib selles piirkonnas pikslite vaheline ala panustada faasinihkega, mis jääb kahes kontrastses piirkonnas soovitud faasinihke vahele. Selline lisapanus ruumilisele faasinihkele mõjutab valguse edasist levikut ning võib kaliibrimisel olla häirivaks.

Modulaatori soojenemine

Peegeldavate SLMide optiline efektiivsus on tüüpiliselt vahemikus 70-90% [5, 6], ehk 10-30% valgusest ei peegeldu ning väli panustab vedelkristalli ja teiste kihtide molekulide võnkumisse, soojendades ainet. Kuna soojenemisel muutuvad vedelkristalli kui faasimodulatsiooni võimaldava komponendi füüsikalised omadused, siis on vajalik arvestada rakendustes kasutava laseri või muu valgusallika kiiritustihedusega. Üldiselt on riistvara spetsifikatsioonides ära märgitud seadme kasutamisel maksimaalne lubatud kiiritustihedus, mida ületades võib kahjustada vedelkristalli. Kui on vaja moduleerida väga suure võimsusega valgust, kus laseri võimsus on suurusjärgus 10 W, siis SLM-e varustatakse ka vedeljahutussüsteemiga, mis külma vett pumbatest reguleerivad vedelkristalli temperatuuri [6]. Sageli kasutatakse võimsa laseriga skeemides justeerimiseks väiksema võimsusega laserit, mis hiljem eksperimenti läbi viies võimsama vastu välja vahetatakse. Kuna vedelkristalli soojenemine mõjutab vedelkristalli füüsikalisi omadusi ning seeläbi faasikostet, on oluline kaliibrimisel kasutada sama võimsust ja ruumilist võimsusjaotust kui hiljem eksperimentis. Vastasel juhul kasutatakse eksperimentis ebakorrektselt faasikõverat, mis ei kirjelda võimsa laseri mõjul soojendanud vedelkristalli tegelikku faasikostet [4].

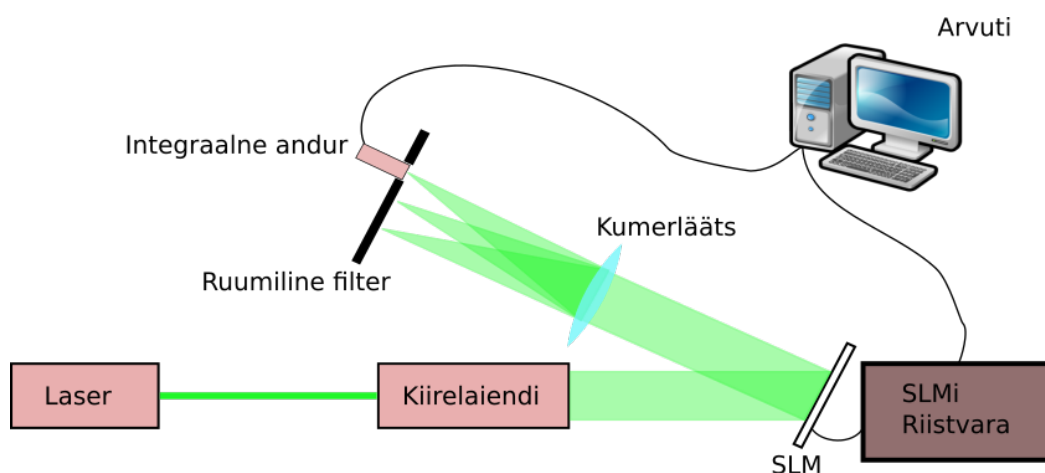
Amplituudmodulatsioon ja polarisatsioonikoste

Kaksikmurduvuse tõttu mõjuvad pealelangeva valguse eri polarisatsioonikomponentidele erinevad murdumisnäitajad, mille tõttu muutub SLMilt peegeldudes valguse polarisatsiooniolek. Pealelangeva valguse polarisatsioonioleku komponentide amplituud muutub SLMi läbides. Seega moduleerib SLM lisaks faasile ka valguse amplituudi, mis võib olla häirivaks nähtuseks rakendustes kus on oluline ühtlase intensiivsuse säilitamine. Sõltuvalt SLMi ehitusest on polarisatsioonioleku mõjutamine kas vältimatu või välditav. Vanemad SLMid kasutavad vedelkristallimooduleid, mis on üle võetud muudest rakendustest ning kus ei olnud oluline polarisatsioonioleku säilitamine. Amplituudmodulatsiooni efekte võib minimeerida, leides SLMi polarisatsiooni omaolekud või kasutades lineaarset polarisatsiooni, mille suund ühtib vedelkristalli pealmise kihi direktori suunaga [10].

1.2 SLMi kaliibrimistehnikad

SLMi kaliibrimist on võimalik viia läbi mitmel viisil, igal meetodil on oma eelised ning nendest lähtuvalt praktilised kasutusolukorrad. Siin alapeatükis tutvustame kahte levinumat kaliibrimismeetodite üldklassi koos kasutusnäidetega ning toome välja nende eelised ja puudused. Käsitleme meetodeid, millega on võimalik leida ruumilise sõltuvusega faasikoste.

1.2.1 Kaliibrimine intensiivsuskostega



JOONIS 1.3: SLMi kaliibrimine difraktsiooni efektiivsust mõõtes. Kumerlääts tekitab tagumisse fokaaltasandisse SLMile kuvatava faasimaski sagedusesituse.

SLMi intensiivsuskoste kaudu kaliibrides jälgitakse difraktsioonivõre sagedusesituse esimese järgu intensiivsust. Joonisel 1.3 kuvatud skeemi kasutades kuvatakse kaliibrimisel modulaatorile võre faasimask ning kumerläätsesga koondatakse peegeldunud valgust. Läätses tagumises fokaaltasandis filtreeritakse piluga välja difraktsioonipildi üks esimestest järkudest ning mõõdetakse selle intensiivsust. Kuna SLMi faasikostel on ruumiline sõltuvus, siis kogu moduleeriva ala võrega katmisel ruumilist infot ei saa. Ruumilise sõltuvusega faasikõvera saamiseks on vajalik leida erinevate SLMi piirkondade panust esimese järgu intensiivsusesse. Üks võimalik lahendus on jagada SLMi pind alapiirkondadeks ning nendes alapiirkondades ükshaaval võre faasimaski kuvada. Töös [4] kasutatakse SLMi faasikoste määramiseks seda meetodit.

Kumerlääts kui Fourier' pööret teostav optiline element

Faasikostet võib leida spetsiaalseid faasimaske SLMile kuvades ning neid kumerläätsesga koondades. Olgu SLMilt peegeldunud ja läätsele kauguselt d langev valgusväli

$$U(x, y) = A(x, y) \exp[i\varphi(x, y)]. \quad (1.2)$$

Siin kirjeldab $A(x, y)$ valguse amplituudjaotust ja $\varphi(x, y)$ valguse faasi ruumilist jaotust. Lisaks eeldame, et fookuskaugusega f läätse pindala on suurem kui tema peal valgustatud ala ning et SLM on ühtlaselt valgustatud, ehk $A(x, y) = A$. Siis läätse tagumises fokaaltasandis on väli kirjeldatud funktsiooniga

$$U_f(u, v) = \frac{A \exp \left[i \frac{k}{2f} \left(1 - \frac{d}{f} \right) (u^2 + v^2) \right]}{i\lambda f} \times \iint_{-\infty}^{\infty} \exp[i\varphi(x, y)] \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (xu + yv) \right] dx dy. \quad (1.3)$$

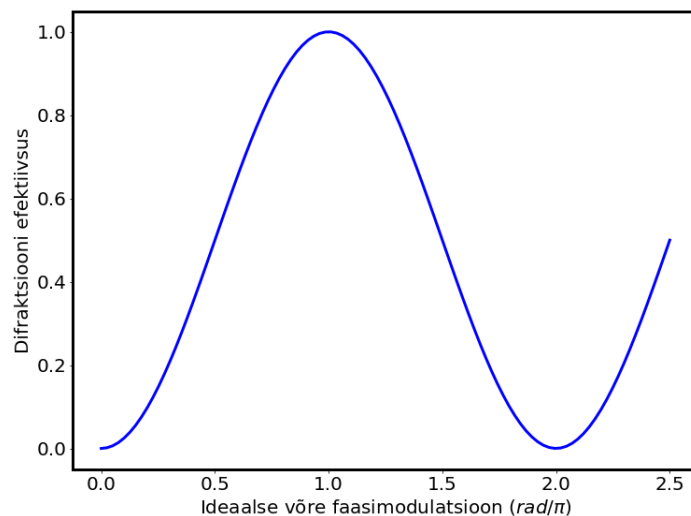
Integraaliga korrutatud u ja v ruutliige on läätse läbimisel tekkinud faasikumerus. Ruutliige kaob erilisel juhul kui $d = f$ ning ilmneb, et lääts kujutab eespoolse fokaaltasandi Fourier' pöörde tagumisele fokaaltasandile. Valguse intensiivsus tagumises fokaaltasandis on antud valemi 1.3 ruuduga. Seega faasimaski $\varphi(x, y)$ ise valides näeme läätse tagumises fokaaltasandis faasipildi sagedusesitust ning võime tagumist fokaaltasandit kutsuda Fourier' tasandiks [11].

Difraktsiooni efektiivsus ideaalse võre näitel

Kaliibrimise eesmärgil pakub huvi difraktsioonivõre faasimask. Võre mask koosneb perioodiliselt kõrvuti paiknevatest ribadest, mida võib jagada aktiivseteks ja mitteaktiivseteks ribadeks. Ribade laius on fikseeritud suurusega l . x ja y määramispiirkond on määratud SLMi peegeldava ala mõõtmetega. Siis faasi väärtuste jaotust on kirjeldatud järgnevalt.

$$g(\phi) = \varphi(x, y) = \begin{cases} \phi, & \text{Aktiivne riba} \\ 0, & \text{Mitteaktiivne riba} \end{cases} \quad (1.4)$$

Siin $g(\phi)$ on võre funktsioon, mis võtab argumendiks faasi ϕ ja tagastab sobiva difraktsioonivõre faasimaski $\varphi(x, y)$. Kui sellisele võre maskile ei ole liidetud staatiline faasiaberratsioon ning võre maskis faasi väärtuse üleminek kahe erineva riba vahel on hüppeline ja mitte pidev, siis sellist võre kutsutakse ideaalseks. Kuvades võre SLMile ja võrelt peegeldunud valgust kumerläätsuga koondades, näeme Fourier' tasandis võre difraktsioonijärke. Kõige heledam, võre nulljark, kirjeldab oma intensiivsusega alaliskomponendi osakaalu SLMile kuvatud faasimaski. Kui faasimaski tekitab funktsioon $g(0)$, siis faasimask $\varphi(x, y) = 0$ ning esineb ainult võre nulljark ehk kogu pilt panustab ainult alaliskomponenti. Arvestades et $\exp(i \cdot 0) = \exp(i \cdot 2\pi)$, siis sama olukord tekib ka $g(2\pi)$ korral, kuigi $\varphi(x, y)$ ei ole kõikjal null.

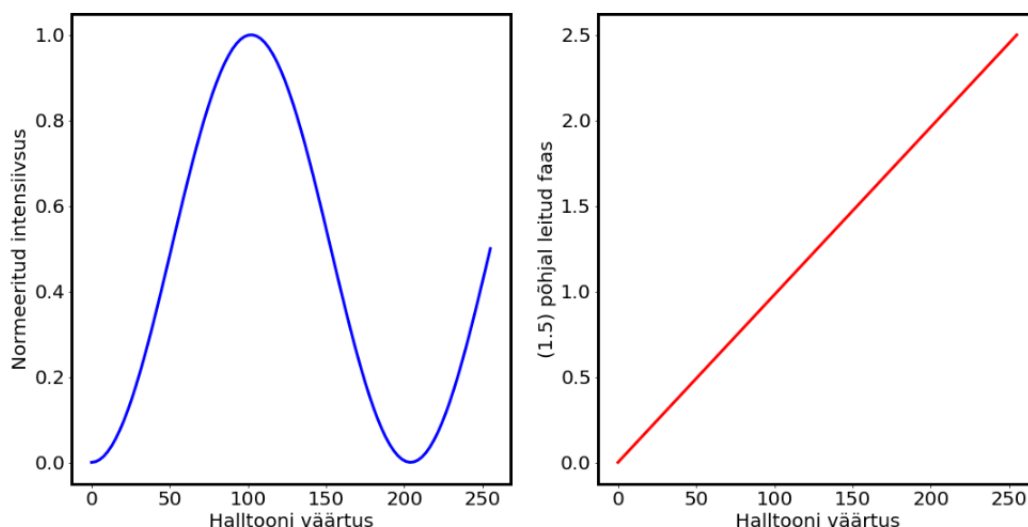


JOONIS 1.4: Sageusesituse esimese järgu intensiivsus sõltuvalt ideaalset võre faasimodulatsioonist. Mõõtes esimese järgu intensiivsust on võimalik määrata võre faasimodulatsioon.

Kõrgemad järgud on kõige intensiivsemad siis kui pealelangeva välja aktiivsete ja mitteaktiivsete ribade juures välja väärtused asuvad komplekstasandil üksteisest võimalikult kaugel, ehk olukorras kus faasimaski tekitab funktsioon $g(\pi)$. Difraktsioonivõre on seda efektiivsem, mida rohkem valgust ta kõrgematesse järkudesse suunab. Mõõtes ühe kõrgema järgu intensiivsust mingite võre tekitavate sisendfaaside vahemikus, saame tulemuseks intensiivsusjaotuse, kus intensiivsus on sõltuvuses võre tekitavast faasist. Kui valida joonises 1.4 võre $g(\phi)$ tekitavate faaside vahemikuks $\phi \in [0, 2.5\pi]$ radiaani, siis kõige suurem intensiivsus mõõdetakse faasi $\phi = \pi$ korral ja kõige väiksem intensiivsus faaside $\phi = 0, 2\pi$ juures. Fikseerides intensiivsusjaotuse ekstreemumite asukohad, võib difraktsioonijärkude intensiivust mõõtes määrata difraktsioonimaski tekitanud funktsioonis $g(\phi)$ sisendfaasi ϕ väärtuse.

Ideaalse võre faasikoste

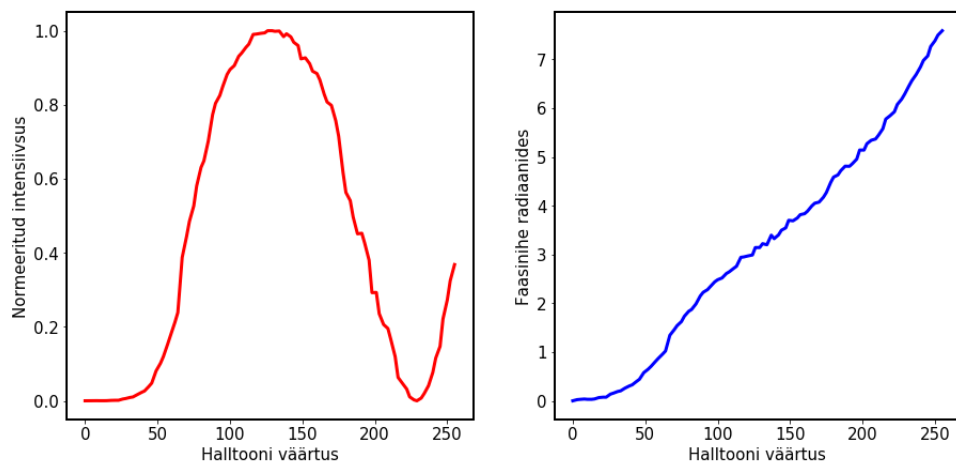
Kaliibrimisprotsessis otsitakse vastavust SLMile saadetava pildi halltoonide ja tegeliku tekkiva faasinihke vahel. Vastavuse leidmiseks määratakse võre tekitamisel aktiivsetele ribadele halltoone vahemikus 0-255 ning tekkivate kõrgemate järkude intensiivsusest on võimalik määrata faasinihe, mis vastava halltooniga tehtud mask esile kutsus. Vastavus halltoonide ja faasinihete vahel määratakse normeeritud intensiivsuskõverast järgnevalt[4].



JOONIS 1.5: Sagedusesituse esimese järgu intensiivsus ja temast tuletatud faasikoste sõltuvalt võre faasimaski tekitavast halltoonist ideaalsel juhul. Ideaalse võre faasikoste on lineaarne.

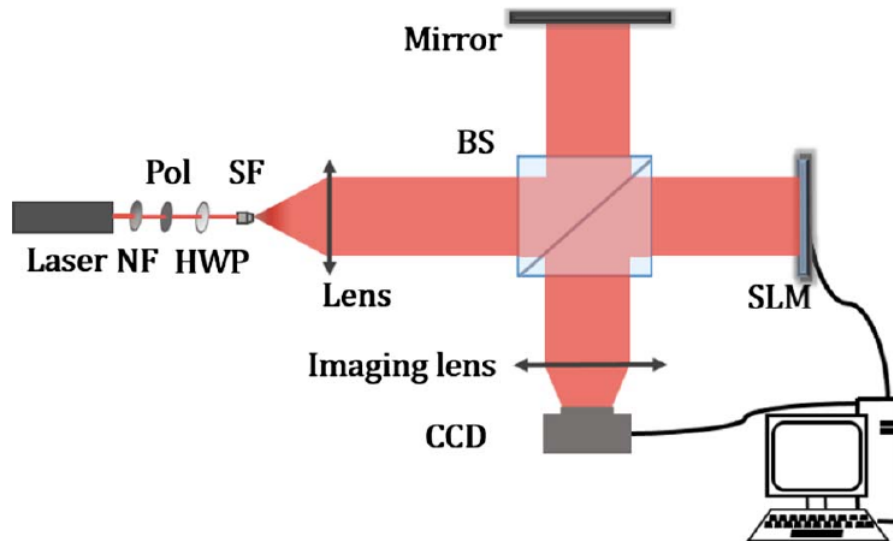
$$\phi(HT) = \begin{cases} 2 \sin^{-1}(I_{norm}(HT)), & \text{Enne esimest maksimumi} \\ 2\pi - 2 \sin^{-1}(I_{norm}(HT)), & \text{Esimese maksimumi ja miinimumi vahel} \\ 2\pi + 2 \sin^{-1}(I_{norm}(HT)), & \text{Peale esimest miinimumi} \end{cases} \quad (1.5)$$

Siin tähistame halltooni väärtusi muutujaga HT ning mõõteandmetest saadud normeeritud intensiivsus on $I_{norm}(HT)$ [4]. Ruumilist faasikostet leides viiakse samasugune faasikõvera arvutus läbi iga vaadeldava SLMi alapiirkonna jaoks. Ideaalse võre puhul on funktsioon $\phi(HT)$ sirge, kuna võre tekitav funktsioon $g(\phi)$ on lineaarne sisendfaasi ϕ suhtes. Reaalse võrega leitud $\phi(HT)$ on üldjuhul mittelineaarne, kuna peegeldava valguse faasi mõjutavad veel alapeatükkis 1.1.2 välja toodud tegurid. Joonisel 1.6 on kuvatud näide mõõdetud intensiivsuskoste ja $\phi(HT)$ kujudest, kus on näha mittelineaarne faasikoste.



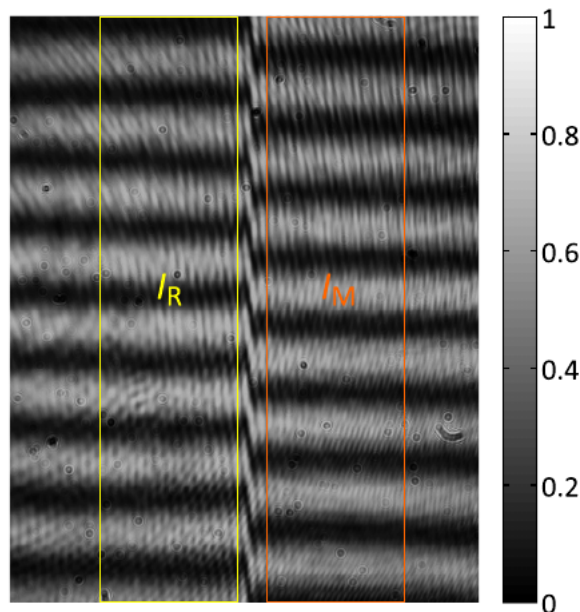
JOONIS 1.6: Näide mõõdetud intensiivsuskõverast $I_{norm}(HT)$ ja sellest 1.5 järgi tuletatud faasikõverast $\phi(HT)$.

1.2.2 Kaliibrimine interferomeetriga



JOONIS 1.7: SLMi kaliibrimisskeem kasutades Twyman-Green interferomeetrit [2].

Interferomeetriga kaliibrides kasutatakse kiirejagajat, mille ühel õlal on uuritav SLM ning teisel õlal on peegel. SLMi kujutatakse läätsega CCD kaamerale, millega vaadeldakse tekkinud interferentsiribasi peegli kallaku muutmisel. Peale peegli fikseerimist kuvatakse SLMile faasimaski pilt. SLMile kuvatav pilt jagatakse kaheks, millest ühel pool jäetakse halltooniks kõikjal null ning teisel valitakse halltoone vahemikus 0-255. Joonisel 1.7 on esitatud olukord, kus halltooni muutmisel muutub SLMi pinnal maski moduleerival poolel tekkiv faasinihe ning sõltuvalt moduleeriva poole valikust hakkab kaamera jälgitavate interferentsiribade vasak või parem pool teise suhtes nihkuma. Kahe piirkonna ribade omavahelise nihke mõõtmisega määratakse SLMi tekitatud faasinihke suurus.



JOONIS 1.8: Interferentsiribade sinusoididele lähendamine võimaldab võrrelda ribade faasivahet. I_R on moduleerimata ala intensiivsusjaotus ja I_M on moduleeritava ala intensiivsusjaotus. [3].

Mõõtmise alguses on ribad kohakuti. Halltoonid kasvades hakkavad moduleeritava poole ribad nihkuma ning ei kattu passiivse poolega. Kui erinevate poolte ribad on poolperioodi võrra nihkes, siis on SLMi faasinihe π ning määratakse vastav halltoon. Halltoonid edasi kasvades moduleeritavad ribad nihkuvad edasi, ribade uuesti kattumisel on SLMi faasinihe 2π . Joonisel 1.8 on kuvatud kahel alal mõõdetud interferentsiribade nihe. Vahepealsed faasimodulatsioonid lähendatakse sinusoidile [2, 3].

Arvestamaks SLMi tegeliku ruumilise faasikostega peab sarnaseid mõõtmisi läbi viima SLMi erinevate alapiirkondade jaoks ning sarnaselt eespool tooduga kirjutama algoritmi, mis kaliibrimisandmeid kasutades tagastab faasimaskile vastava halltoonide pildi SLMile kuvamiseks.

Interferomeetris tekib faasinihe interferomeetri õlgade käiguvahe erinevusest. SLMi kaliibrides tekitatakse vedelkristalli kahes osas erineva pinge rakendamisega käiguvahede erinevus, mida jälgime kaameras interferentsiribadena [12].

1.2.3 Aberratsioonide mõju kaliibrimismeetoditele

Peatükis 1.1.2 välja toodud faasikostet mõjutavad tegurid võivad mõjuda erinevatel kaliibrimismeetoditel erinevalt. Modulaatori soojenemisega arvestades peab samuti mõlemas meetodis kaliibrima hiljem eksperimendis kasutatava laseri ja võimsusega. Erinevused võivad sisse tulla tootmistehnikate piirangutest tekkinud staatilise aberratsiooni juures ning pingestusskeemis vedelkristalli läbiva elektrivälja hajumine pikslitevahelisse alasse.

Kui interferomeetial põhinevate meetodite juures määrab interferentsiribade kattumine rangelt ära tegeliku faasinihke, siis SLMi pingestusskeemi mõju faasikostele võib vähesel määral nihutada mõõdetava intensiivsusjaotuse ekstreemumeid difraktsiooni efektiivsuse kaudu kaliibrides. Staatiline faasiaberratsioon eksreemumeid ei nihuta, kuid hajutab difraktsioonivõre sagedusesituses järkusi vastavalt enda kujule. Difraktsiooni efektiivsusega kaliibrides staatilise faasiaberratsiooni kuju ei ole võimalik leida.

1.3 Faasihogramm

SLMi rakendustes on väga levinud faasihogrammide kuvamine. Faasihogramm kuvatakse SLMile ning peegeldunud moduleeritud valgusest võetakse läätsega Fourier' pööre. Faasihogrammi eesmärgiks on kasutaja valitud intensiivsusjaotuse tekitamine läätse tagumises fokaaltasandis. Fourier' pöördteisendust kasutades on võimalik määrata väli, mille sagedusesituseks oleks valitud intensiivsusjaotus. Kuna intensiivsusjaotuse kuvamisel võib valguse faasijaotuse Fourier' tasandis vabalt valida, siis on võimalik sama soovitud intensiivsusjaotust tekitada paljude erinevate hologrammidega SLMi tasandis. Enamasti kasutatakse hologramme, kus moduleeritakse ainult valguse faasi ja eeldatakse, et SLM on ühtlase valgustatud. Faasihogramme kasutatakse näiteks mikroosakeste optilises lõksutamises [4], krüptograafias [13] ja optilistes arvutites [14].

Sagedusesituses etteantud intensiivsusjaotusele vastava faasi ruumilises esituses taastavaid algoritme kutsutakse faasitagastusalgoritmideks (*phase retrieval algorithm*). Neist tuntuim ja levinuim on Gerchberg-Saxtoni (GS) algoritm [15, 16]. GS algoritm on arvutuslik meetod mis kasutab diskreetse Fourier' pöörde algortimi FFT (*Fast Fourier Transform*), et leida sagedusesituse intensiivsusjaotusele vastav faasihogramm. Intensiivsusjaotus võib olla kasutaja tahte järgi valitud suvaline sobivate mõõtmetega sihtpilt

arvutis. Algoritm on iteratiivne, valitakse suvaline algfaas φ_0^H , mis iga algoritmi iteratsiooniga läheneb õigele faasimaskile. Järgnevalt on esitatud algoritmi ühe iteratsiooni käik, kus ülemine indeks H viitab väljale (u), faasile (φ) või intensiivsusele (I) hologrammi tasandis ja ülemine indeks F viitab sagedusesituse tasandile. Hologrammi tasand ühtib SLMi pinnaga.

$$u_n^H = \exp(i \cdot \varphi_{n-1}^H) \quad (1.6)$$

$$\varphi_n^F = \arg(\text{FFT}(u_n^H)) \quad (1.7)$$

$$u_n^F = \sqrt{I^F} \exp(i \cdot \varphi_n^F) \quad (1.8)$$

$$\varphi_n^H = \arg(\text{FFT}^{-1}(u_n^F)) \quad (1.9)$$

Siin viitab $\arg(\exp(i \cdot \alpha)) = \alpha$ komplekssete väärtustega välja faasile. Esimesel real leitakse väli hologrammi tasandis ning teisel real leitakse selle välja sagedusesituse faas Fourier' tasandis. Kolmandal real pannakse kirja sihtpildile vastav väli sagedusesituses, kus amplituudi määrab sihtpildi intensiivsuse ruutjuur ning välja faas on määratud hologrammi sagedusesituse faasiga. Viimasel real leitakse Fourier' pöördteisenduse kaudu väli hologrammi tasandis, mille sagedusesitus oleks sihtpildi väli sagedusesituses. Selle välja faas koondub algoritmi mitmel iteratsioonil soovitud faasihologrammiks [15].

2 Meetodid

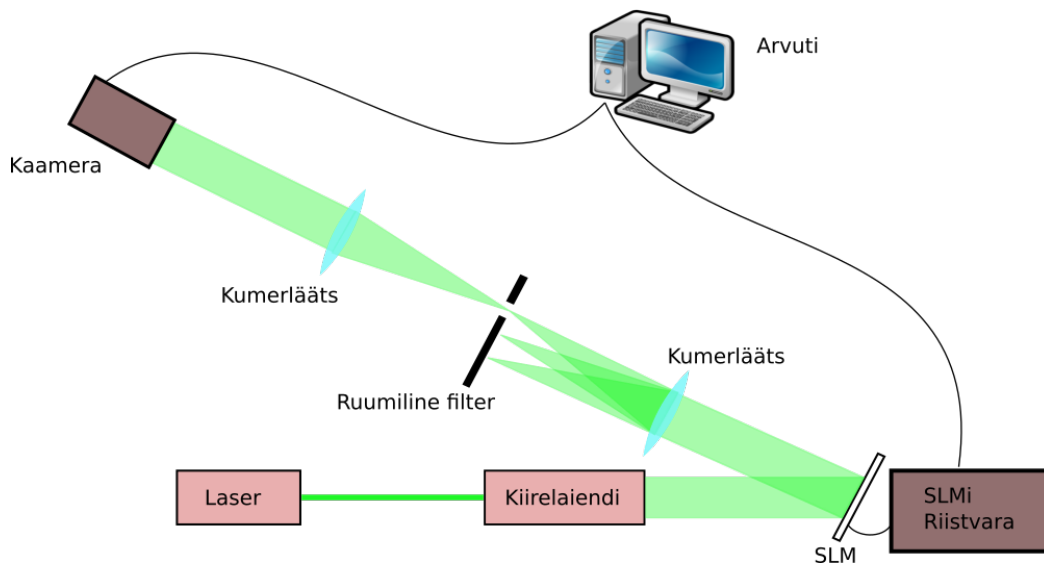
Selles peatükis tutvustame ruumilise faasikoste määramiseks alapeatükis 1.2.1 kirjeldatule sarnast tehnikat. Teeme ülevaate kaliibrimise skeemis kasutatavaid optilisi elemente koos parameetritega ning kirjeldame katse spetsiifikat. Peale kaliibrimiseks vajalike mõõtmiste üksikasjade kirjeldust tutvustame vajaminevat andmetöötlust, et leida mõõteandmetest SLMi faasikostet kirjeldav süsteem. Viimasena kirjeldame leitud faasikoste hindamiseks meetodeid ning faasihologrammide pildistamise skeemi.

2.1 Tähtsamad optilise skeemi elemendid

Käesoleva töö olulisim komponent on ruumiline valgusvälja modulaator. Töös kasutati peegeldavas režiimis töötav SLM HoloEye LC-R 2500, mis kasutab valguse moduleerimiseks firma Philips toodetud L-COS (*Liquid-Crystal On Silicon*) ekraani. SLMi vedelkristalli kihil on pöördenurk $\beta = \pi/4$. Kuigi selline vedelkristall pöörab teda läbides pealelangeva valguse polarisatsiooniolekut, ei ole need efektid modulaatorilt peegeldunud valguses jälgitavad, kuna peegeldudes läbitakse sama vedelkristallikiht teises suunas ning polarisatsiooniolek pööratakse tagasi algseks.

Kaliibrimisel kasutatakse Thorlabs'i dioodlaserit CPS532, mis kiirgab lainepikkusel 532 nm. Andmeid salvestatakse monokromaatse FLIRi CMOS kaameraga Grasshopper 3, mida on seadistatud pildistama 16-bitiste halltoonidega pilte. Kaamera teeb pilte resolutsiooniga 2048×2048 .

2.2 Difraktsioonivõre efektiivsuse mõõtmine ruumilise lahutusega



JOONIS 2.1: Optiline skeem SLMi kalibramiseks CMOS kaameraga.

Käesolevas töös kasutatav tehnika põhineb artiklil töö [4], milles ruumiline info leiti SLMi pinda alapiirkondadeks jagades ning igas alapiirkonnas tekitatud võre kujutamisel difraktsioonipildi esimese järgu intensiivsust mõõtes.

Joonisel 2.1 esitatud optilises skeemis kalibreeritakse SLM kaamerat kasutades. Kaameraga kalibreerides kuvatakse SLMile kogu tema pinda kattev difraktsioonivõre. Peale läätsesga modulaatorilt peegeldunud valguse koondamist filtreeritakse ruumiliselt sagedusesituse esimene järk. Pärast ruumilist filtrit paikneb skeemis veel üks kumerlääts, moodustades $4f$ süsteemi. SLMi kujutamisel kumerläätsesga tõstab võre faasimask SLMi sagedusesituse difraktsioonivõre kõrgematesse järkudesse. Nende järkude intensiivsus sõltub võre maski tekitamisel aktiivsete ribade faasist ϕ . Tagumine kumerlääts võtab sagedusesituse esimesest järgust uuesti Fourier pöörde ja taastab SLMi pinna ruumilise esituse, mida kujutatakse kaamera sensorile.

Difraktsioonivõre faasimaski tekitatav faasinihe valguse peegeldumisel SLMilt ei ole SLMi ruumilise sõltuvusega faasikoste tõttu võre aktiivsete ribade juures ühese väärtusega. Seetõttu ei ole SLMi kujutise intensiivsuse jaotus peale teist Fourier pööret enam sama, mis

algselt SLMilt peegeldudes. Ideaalsel juhul saavutab esimese järgu ruumiline esitus intensiivsuse maksimumi võre tekitava faasi π juures kõigis kujutise punktides korraga nii, et kujutis on ühtlaselt intensiivne. Viimane eeldab, et SLM on ühtlaselt valgustatud.

Ruumilise faasikoste tõttu hakkavad SLMi kujutises ilmnema intensiivsuse maksimumid erinevate võre tekitavate faaside juures. Kuna kogu SLMi pind on korraga kaamera vaateväljas, siis piltide alusel saab määrata ruumilise sõltuvusega faasikoste ruumilise lahutusega difraktsiooni efektiivsuse intensiivsusjaotusest. SLMile kuvatakse difraktsioonivõre faasimaskid iga uuritava halltooniga vahemikus 0-255. Selle käigus jälgib kaamera difraktsioonivõre esimeses järgus intensiivsuse muutust kogu SLMi pinnal.

Andmetöötluse jooksul jagatakse SLMi pilt alapiirkondadeks, milles intensiivsus keskmistatakse ning leitakse iga piirkonna jaoks eraldi faasikosted. Leitud faasikosted lubavad tuletada kaliibrimiskõvera, mis tagastab kindlas asukohas tekitada soovitavale faasinihkele halltoonide väärtuse. Käsitlevat meetod töötab ka juhtudel, kus SLM ei ole ühtlaselt valgustatud, kuna meid huvitab alapiirkondades suhtelise intensiivsuse mõõtmine.

2.2.1 Kasutatava meetodi võrdlus teiste kaliibrimistehnikatega

Käesolevas töös kasutatav kaamerat rakendav meetod on mitmes olukorras teistele eelistatav ning on lihtsamini rakendatav nii mõõtmiste etapis kui ka hiljem andmetöötluses. Järgnevana võrldeme kaamerat kasutatavat tehnikat teiste kaliibrimistehnikatega.

Võrdlus alapiirkondi eraldi mõõtmisega

Difraktsioonivõre efektiivsuse mõõtmine integraalse anduriga nõuab ruumilise info saamiseks difraktsioonivõre kuvamist SLMi alapiirkondadesse ja nendes alapiirkondades eraldi mõõtmiste läbiviimist. Kuna igas alapiirkonnas on vaja tekitada difraktsioonivõre faasimask halltoonidega vahemikus 0-255, siis mõõtmisteks SLMi alapiirkondadeks jagamine nõuab palju rohkem aega kui kogu SLMi pinna kujutamisel ja kaameraga pildistamisel. Lisaks suuremale ajalisele kulule on alapiirkonda katva difraktsioonivõre väikese suuruse tõttu tema sagedusesituses väikese võre ääreefektidest tingitud moonutused.

Kaameraga pildistamine pakub eeliseid ka andmetöötuse käigus. Nii kaamerat kasutades kui ka alapiirkondi eraldi mõõtes on hiljem andmetöötuses vajalik, et SLMi pind oleks alapiirkondadeks jagatud. Nendes alapiirkondades intensiivsusi keskmistades leitakse igale alapiirkonnale vastav faasikoste. Kõigi üksikute faasikostete väärtuste põhjal tuletatakse faasikoste ruumilist sõltuvust arvestav kaliibrimiskõver, mida kuvatavatel faasimaskidel rakendada. Alapiirkondi eraldi mõõtvast meetodis on alapiirkonna suurus enne kaliibrimist valitud ning saadud mõõteandmed lubavad tuletada ruumilise faasikoste ainult sellise ettemääratud keskmistamise põhjal. Suuremad alapiirkonnad tähendavad keskmistamist üle suurtemate SLMi alade, milles võib peenem ruumiline info kaduma minna. Sobiva alapiirkonna suurus ei ole alapiirkondade üksikmõõtmisega võimalik ilma lisamõõtmisteta leida. Kaameraga pilte tehes on võimalik andmetöötuses alapiirkonna suurus kasutaja tahte järgi määrata ning seega sobivaim suurus leida.

Võrdlus interferomeetriliste tehnikatega

Interferomeetrial põhinevad kaliibrimistehnikad ei vaja üleminekuid sagedusesitusse ja mõõdavad käiguvahe kaudu otse faasinihet SLMi eri piirkondades. Tehnikate põhimõteteliste erinevuste tõttu on interferomeetritel sisulisi rakenduslikke erinevusi võrreldes difraktsiooni efektiivsusel põhinevate meetoditega, milles ühed tehnikad on suutlikumad kui teised.

Tootmisvigade tõttu ei ole SLMi vedelkristalli kiht tasane ning esineb ruumiliselt erineva staatiline faasimoonutus, mida kirjeldasime peatükis 1.1.2. SLMi läätsega kujutades panustab moonutus sagedusesituse intensiivsusjaotusesse. Samas ei moonuta ta difraktsioonivõre sagedusesituse järkude intensiivsust, vaid difraktsioonivõre tõstab faasimoonutuse sagedusesituse ka kõrgmatesse järkudesse. Difraktsiooni efektiivsuse kaudu kaliibrides faasimoonutus mõõdetud intensiivsuskõverat ei mõjuta, kuid leitud ruumiline faasikoste ei kompenseeri faasimoonutust ning temast tekivad efektid jäävad hilisemal SLMi kasutamisel sisse.

Kuna interferomeeter leiab faasikoste kahe võrdlusõla käiguvahe kaudu, siis lõplikusse faasinihkesse panustab ka ruumiliselt erineva vedelkristalli kihi paksusest tekkinud käiguvahe ning interferomeeter suudab staatilise faasimoonutusega arvestada. Samas on kaliibrimise

skeem interferomeetri jaoks keerulisem, kaameraga skeemi on kergesti võimalik paigutada olemasolevasse eksperimenti lisapeegliga. Interferomeeter on ka palju tundlikum õhu liikumise ja vibratsioonide suhtes, kaamerat kasutav skeem on palju stabiilsem.

2.3 Kaliibrimisprotsess

Kaameraga kaliibrimisel kasutame joonisel 2.1 kujutatud skeemi, teisi tehnikaid ei kasutata. Kaamerat kasutatava meetodiga demonstreerime eeliseid SLMi ruumilise sõltuvusega faasikoste arvestamisega.

2.3.1 Kaliibrimine

Kaliibrimise käigus pildistame difraktsioonivõre maski esimesse järku tõstetud SLMi pinda sajale erinevale halltoonile vastava võre maskiga. Polariseerimisefektide minimeerimiseks on kaliibrimise skeemi enne SLMi paigutatud vedelkristalli kihi pealmise osa direktoriga samasuunaline \vec{x} -sihiline polarisaator ning vahetult peale SLMi \vec{x} -sihiline analüsaator. Peegeldumisnurk SLMilt hoitakse võimalikult väike (9°), et vältida SLMi pinna kujutise moonutamist.

Iga halltooni juures SLMi pildistamine on arvutiprogrammiga automatiseeritud, kasutades kaameraga koos töötavat Pythoni teeki. Samas koodis on fikseeritud kaamera säriaeg, gamma väärtus ja muud seaded, et kahe erineva halltooni juures tehtud pildi heleduse erinevused tuleneksid ainult erinevast difraktsiooni efektiivsusest.

2.3.2 Andmetöötlus

Andmetöötluseks on kirjutatud analüüsiklass Pythonis, kus on funktsioone andmetöötluse läbiviimiseks. Kasutatakse levinud Pythoni teeki NumPy, matplotlib, OpenCV ja SymPy. Andmetöötluse eesmärk on kaamera tehtud piltidest tuletada funktsioonide parameetrid. Otsitavad funktsioonid teisendavad faasikoste ruumilise sõltuvusega arvestades etteantud faasimaski halltoonide pildiks. Andmetöötluseks kirjutatud kood on leitav viites [17].

Analüüsiklass loeb sisse saja difraktsioonivõre halltooni juures tehtud pilti numpy massiiviks, millel on võimalik klassi isendifunktsioone rakendada. Kaliibrimise eesmärgil on

neist olulisim funkstioon, mis sisseloetud piltide massiivist tagastab valemi 1.5 järgi 2^{2n} alapiirkondade faasikõverad nende intensiivsusi igas alapiirkonnas igal halltooni sammul keskmistades. 2^n on kasutaja määratud parameeter, mis vastab alapiirkondade arvule piki ühte pildi telge. Mõlemal pildi teljel on sama palju alapiirkondi, nii et iga üksik alapiirkond on pildi 4:3 kuvasuhte tõttu riskülik.

Mugavaks kasutuseks on leitud faasikostetest lähendatud polünoom $HT(\phi, x, y)$ mis võtab argumentideks tekitada soovitava faasinihke ϕ asukohas (x, y) . Polünoom tagastab halltooni, mis etteantud asukohas tekitab SLMi pikslil sellise pinge, et sealt peegeldunud valgus saab faasinihke ϕ . Polünoomil valitakse järk J , mis on faasikõvera potentsiaalselt keerukate kujudega arvestamiseks suur, vahemikus 6-9. Polünoomis esinevad liikmed $\phi^k, x^l, y^m, x^l y^m, x^l \phi^k, y^m \phi^k, x^l y^m \phi^k$, mille maksimaalne summaarne aste on $k + l + m = J$. Leitud vastavused iga halltooni ja tekkiva faasinihke vahel igas alapiirkonnas paigutatakse lineaarsesse võrrandite süsteemi

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & \phi_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & x_1 \phi_1 & \cdots & y_1 \phi_1^6 & \phi_1^7 \\ & & & & \vdots & & & & & \\ 1 & x_1 & y_1 & \phi_K & x_1^2 & x_1 y_1 & x_1 \phi_K & \cdots & y_1 \phi_K^6 & \phi_K^7 \\ & & & & \vdots & & & & & \\ & & & & \vdots & & & & & \\ 1 & x_N & y_N & \phi_1 & x_N^2 & x_N y_N & x_N \phi_1 & \cdots & y_N \phi_1^6 & \phi_1^7 \\ & & & & \vdots & & & & & \\ 1 & x_N & y_N & \phi_K & x_N^2 & x_N y_N & x_N \phi_K & \cdots & y_N \phi_K^6 & \phi_K^7 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{c} = \begin{bmatrix} HT(\phi_1, x_1, y_1) \\ \vdots \\ HT(\phi_K, x_1, y_1) \\ \vdots \\ \vdots \\ HT(\phi_1, x_N, y_N) \\ \vdots \\ HT(\phi_K, x_N, y_N) \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Siin $\mathbf{c} = [c_0 \ c_1 \ \cdots \ c_M]$, mille liikmed c_i on otsitavad koefitsiendid, mis määravad polünoomi. M on polünoomi liikmete arv, mis näiteks 7. järku polünoomi puhul on $M = 120$. Iga rida vasakpoolsel maatriksil on polünoom koordinaatide kogumi (ϕ_i, x_j, y_k) jaoks, millele vastab paremalpool võrdusmärgi halltoon $HT(\phi_i, x_j, y_k)$. $HT(\phi_i, x_j, y_k)$ on halltoon mis modulaatori mingis alapiirkonnas keskpunktiga (x_j, y_k) tekitab faasinihke ϕ_i . K on kasutatud halltoonide arv vahemikus 0-255 ning N on vaadeltavate alapiirkondade arv. Maatrikskujul lineaarvõrrandite süsteemi lahendamisel leiame koefitsiendid c_i ning saame polünoomi soovitavate piksli väärtuste leidmisel kasutada [4].

Kuna üldjuhul on lineaarsete võrrandite süsteem 2.1 üledefineeritud, siis analüütilist lahendit ei leidu. Seega on \mathbf{c} leidmiseks vaja kasutada vähimruutude lähendit, siin ma sõnastaks ümber. millele on lineaarsete võrrandite süsteemi korral analüütiline lahend [18]. Kui \mathbf{X} on $m \times n$ maatriks, \mathbf{w} on n pikkune vektor ning \mathbf{Y} on m pikkune vektor, kusjuures süsteem on üledefineeritud, siis vähimruutude lahend \mathbf{w} jaoks avaldub kujul

$$\mathbf{w} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} (\mathbf{X}^T \mathbf{Y}). \quad (2.2)$$

Kui valemit 2.2 kasutades leida \mathbf{c} , siis on võimalik leitud polünoomi kasutades kirjutada algoritm, mis võtab sisendiks faasimaski mida soovitatakse SLMile kuvada ning tagastab SLMile saatmiseks halltoonide pildi.

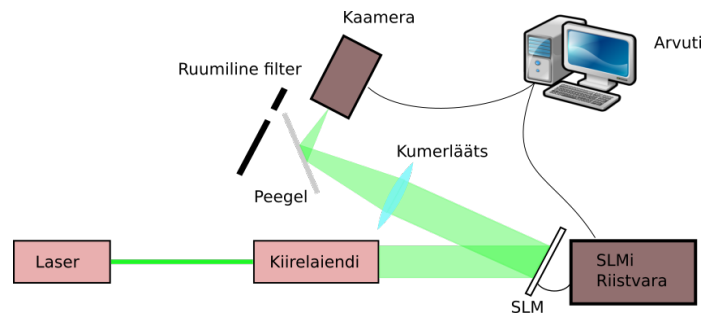
2.3.3 Kaliibrimise tulemuste hindamine

Leitud polünoomi efektiivsust SLMi kirjeldamisel on võimalik määrata nii arvutuslikult kui ka erinevate faasihologrammide võrdlusega, millel on kasutatud erinevaid kaliibrimistehnikaid. Tulemuste hindamiseks leiame andmetöötlusega esiteks sobivama alapiirkondade arvu 2^{2n} ning kirjeldame polünoomiga arvutatud halltooni kõrvalekalduvust mõõdetud intensiivsusest tuletatud halltoonist igas 2^{2n} alapiirkonnas. Võrdleme kaliibrimise edukust neljal juhul:

1. SLMi lineaarse faasikoste eeldamine, koste ruumilise sõltuvusega ei arvestata.
2. SLMi kogu pinna intensiivsuse keskmistades arvutatud globaalne faasikõver. Arvestatakse koste mittelineaarsusega, kuid mitte tema ruumilise sõltuvusega.
3. Alapiirkondade faasikostetest kogu SLMi ruumilist faasikostet kirjeldav polünoom $HT(\phi, x, y)$.
4. Alapiirkondade faasikostete otsene rakendamine kastidega kaliibrimisel. Kuvatav faasimask jagatakse alapiirkondade järgi kastideks ning igas kastis rakendatakse vastavas alapiirkonnas arvutatud faasikostet.

Erinevate kaliibrimistehnikate võrdluseks viime uuesti läbi kaameraga kaliibrimise. See-kord ei otsi me vastavust difraktsioonivõres kuvamisel kasutatud halltooni ja difraktsiooni efektiivsuse kaudu mõõdetud faasi vahel, vaid võre kuvamisel kasutatud sihtfaasi ja mõõdetud väljundfaasi vahel. Teisel kaliibrimisel kasutame sama skeemi 2.1. Ideaalse kaliibrimise korral oleks mõõdetud faasikoste $\phi_{\text{sisse}} = \phi_{\text{välja}}$ ning saame jälgida kui hästi mõõdetud kused sellega kattuvad.

Edasi loome sihtpildist Gerchberg-Saxtoni algoritmi kasutades faasihologramme (peatükk 1.3). Faasihologrammidel rakendame halltoonipiltideks teisendamisel nelja kaliibrimistehnikat. Hologrammide kuvamisel näeme SLMilt peegeldunud välja sagedusesituses hologrammide tekitamisel kasutatud sihtpilti.



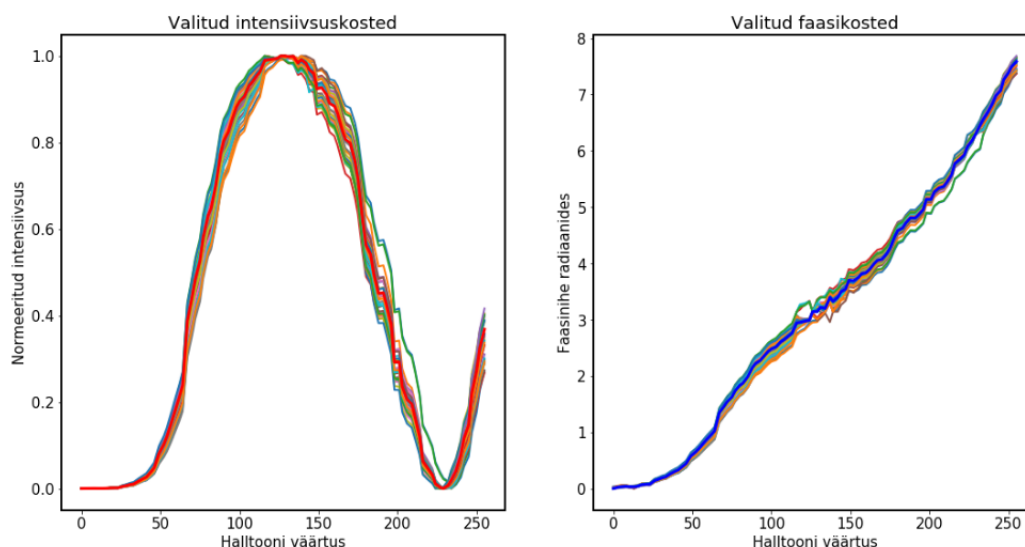
JOONIS 2.2: Optiline skeem faasihologrammide pildistamiseks kaameraga. Peegel suunab läätse fokaaltasandi ruumilisest filtrist kõrvale kaamera sensorile.

Joonisel 2.2 on kuvatud hologrammide sagedusesituste pildistamise skeem. Skeemis on hologrammide pildistamiseks paigutatud ruumilise filtri ette kahe tolli laiune peegel. Peegel suunab läätse fokaaltasandi ruumilisest filtrist kõrvale, kuhu on ümber paigutatud kaamera. Kaamera pildistab läätse fokaaltasandit.

3 Tulemused

Tulemuste peatükis esitame mõõtmistulemustest saadud ruumilise faasikoste graafikud ning analüüsime nende kuju ja arutame eripärade üle. Võrdleme sisendfaasi ja väljundfaasi vastavust kasutades erinevaid kaliibrimise meetodeid ning kuvame faasihologramme ühest sihtpildist. Kõik tulemused on saadud samast mõõteseriast, kus kasutati sada erinevat halltooni võre faasimaskide tekitamisel.

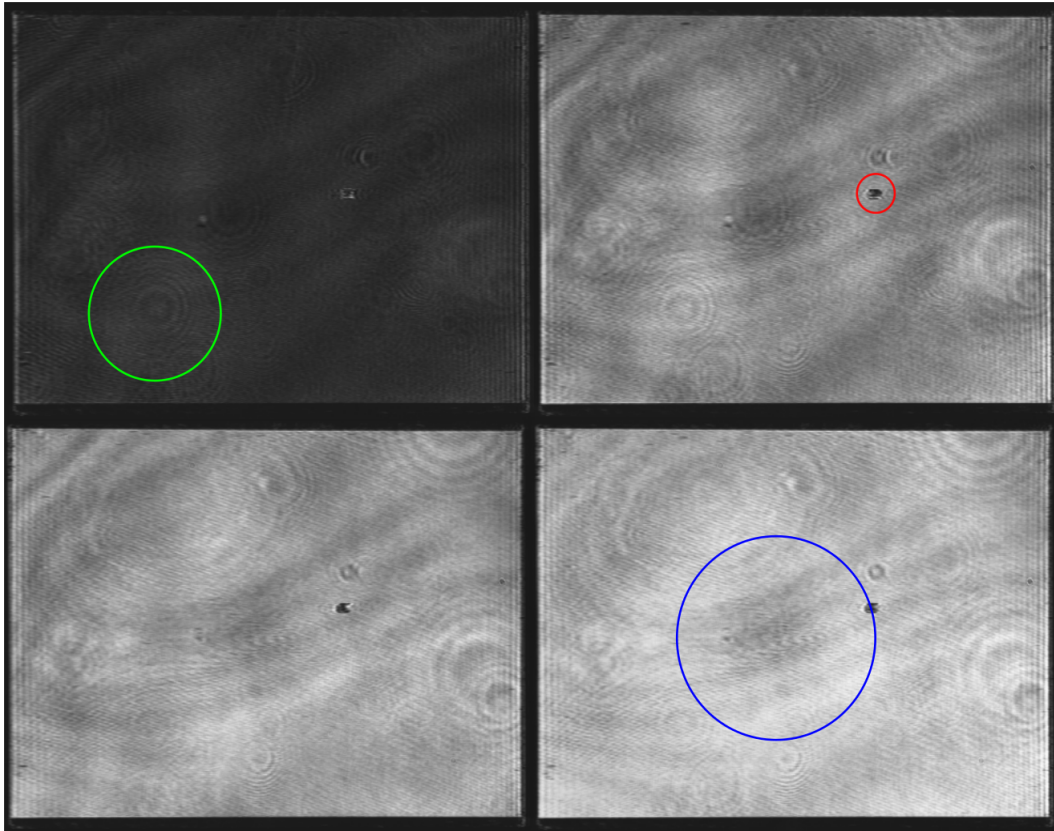
3.1 Arvutatud faasikoste



JOONIS 3.1: 1024 alapiirkonna seast valitud intensiivsuskosted näitamaks ruumilise faasikoste olemasolu. Punane joon on keskmistatud intensiivsuskoste ja sinine joon on selle põhjal leitud faasikoste.

Andmetöötluses alapiirkondadele vastavaid intensiivsuskosteid ja nendest tuletatud faasikosteid korraga kuvades ilmneb faasikoste ruumilise sõltuvuse olemasolu. Joonise 3.1 parempoolisel graafikul vastab üks faasinähe väärtus mitmele võimalikule halltoonile modulaatori eri piirkondades. Huvitav on jälgida sama joonise vasakpoolset intensiivsuskoste graafikut. Halltoonide vahemikus 60-70 toimub järsk hüpe kõigi alapiirkondade jaoks, ning ka mujal on jälgitavad hüpped normeeritud intensiivsuses, mis toimuvad samaaegselt

kõikides alapiirkondades. Ilmselt tekitavad neid rikked või ebatäpsused SLMi pingestus-skeemis, mida meil täpselt kompenseerida pole võimalik. Faasikoste graafikul on näha, et halltoonide piirkonnas 60-70 toimub samuti järsk hüpe, mis tähendab et faasi määramise täpsus selles piirkonnas on madalam kui mõne laugema ülemineku juures.



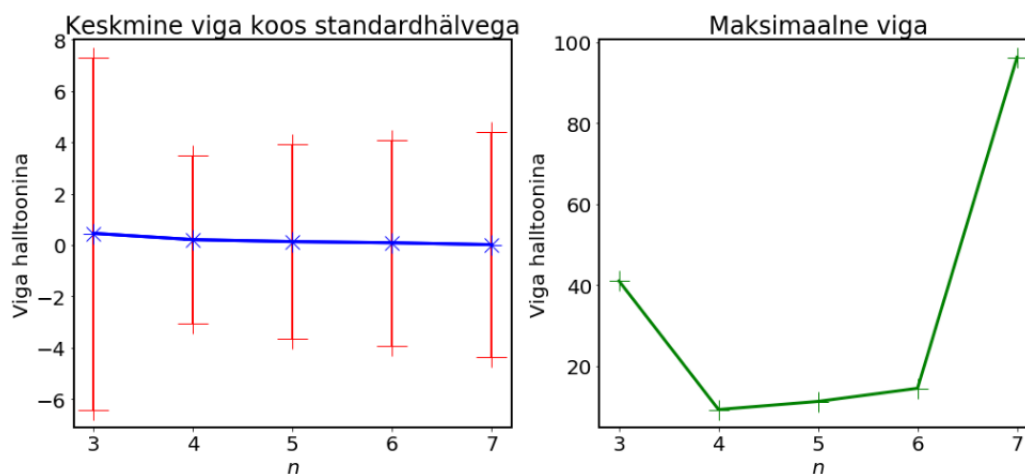
JOONIS 3.2: Näiteid CMOS kaamera tehtud piltidest. Ülemisest vasakpoolsest pildist päripäeva liikudes on pilte tekitavate võrede halltoonid 57, 82, 124, 170.

Joonisel 3.2 on näiteid toorandmetest, millest faasikõverad tuletati. Piltidel on värviliste ringidega märgitud mõõtmistel müra tekitavad ilmingud. Rohelise ringiga on ümbritsetud näide interferentsirõngastest, mis tekivad tolmutübumetest skeemis kasutatavatel optilistel elementidel. Faasikoste arvutamisel pidi valima alapiirkonnad piisavalt suured, et interferentsirõngad ei mõjutaks nende intensiivsust. Punase täpiga on märgitud laik, mis esineb igal pildil. Tegemist on mustusega SLMi klaaskattel, mida ei olnud võimalik eemaldada. Selle tõttu jäi see laik arvutatud kostesse artefaktina sisse. Suure sinise ringiga on piiratud tume laik, mis samuti esineb igal pildil. See tuleneb kasutatava laseri intensiivsusaotusest, mis ei valgusta SLMi pinda ühtlaselt. Kasutatavas meetodis ei ole see häirivaks teguriks, kuna igas alapiirkonnas arvutatakse vastav faasikoste intensiivsuse

suhtelisest muudust piirkonna sees. Kui SLMi pinna valgustatus ei muutu katse jooksul, siis leitakse korrektne faasikoste.

3.2 Polünoomi määramine

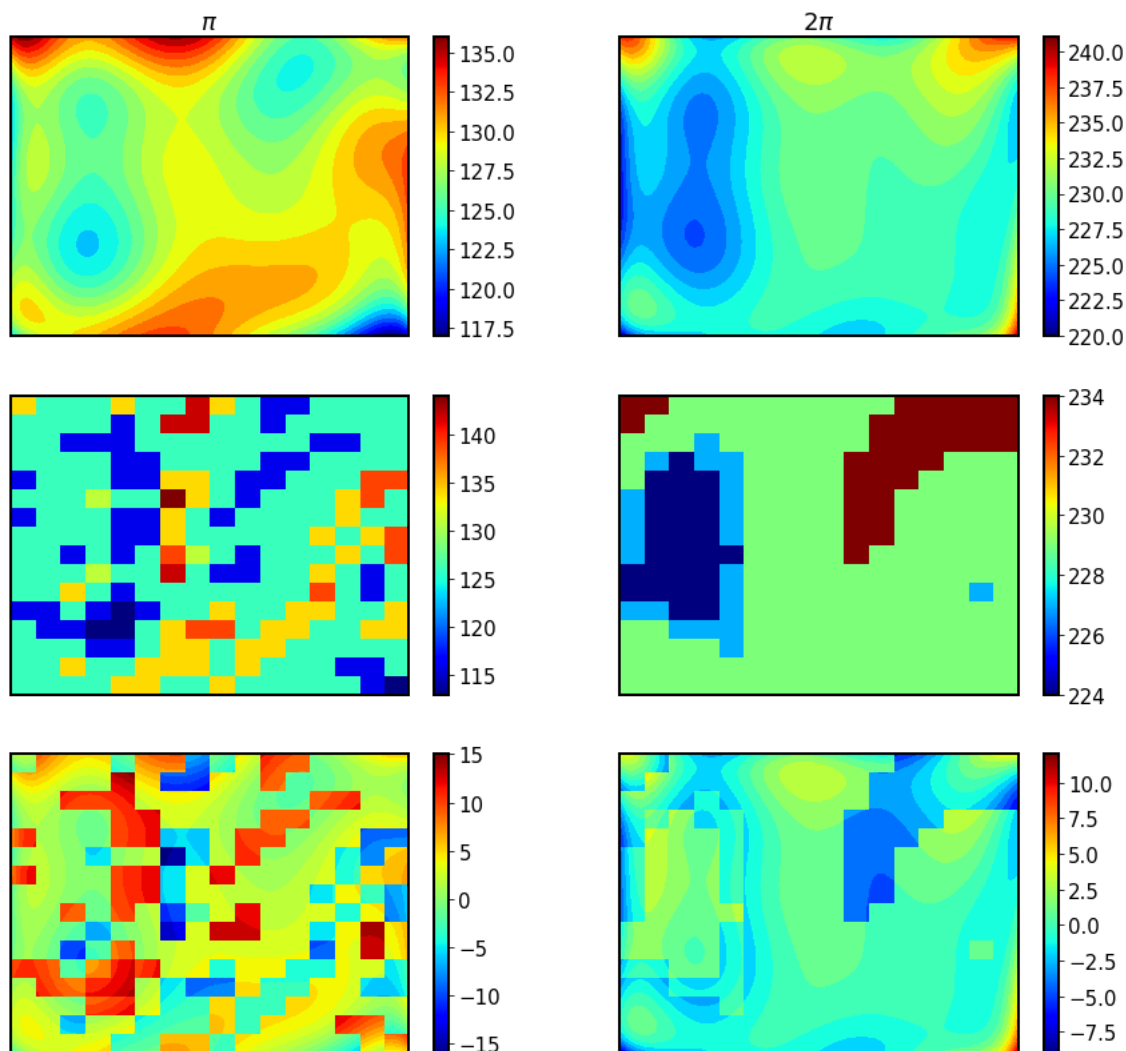
Olles piltide põhjal alapiirkondade faasikosted leidnud, arvutame faasikostete põhjal välja seitsmendat järku liikmetega polünoomi $HT(\phi, x, y)$ määramiseks koefitsiendid. Seitsmendat järku polünoom suudab arvestada keerukamate struktuuridega SLMi faasikostes, vältides suurte Runge efektide teket SLMi servades. Polünoom määratakse mõõteandmetest alapeatükis 2.3 välja toodud viisil. Esmalt leidsime sobivaima alapiirkondade arvu 2^{2n} . Sobivaim n leitakse simulatsiooni teel. SLMi pilte jagatakse erinevaks alapiirkondade hulkadeks ning nende põhjal leitakse SLMi faasikostet lähendav polünoom. Polünoomi lähendusvõimet iseloomustame polünoomiga faasitasandeid arvutades ning nendelt tasanditelt mõõteandmete lahutamise. Faasitasandiks on halltoonide pilt, kus iga piksli halltoon on tema asukohas faasitasandi faasi tekitamiseks vajaliku väärtusega.



JOONIS 3.3: Sobiva alapiirkondade hulga n^2 valik.

Joonise 3.3 vasakpoolsel graafikul on sinise joonega kirjeldatud keskmine viga faasitasandite arvutamisel sõltuvalt alapiirkondade hulka määravast parameetrist n . Graafikul on punaste joonte ja ristidega märgitud ka vea mõõtemääramatus standardhälbe tasemel. Viga on määratud kui vahe polünoomiga arvutatud faasitasandile vastavast halltoonide pildist ja alapiirkondade faasikostetega määratud faasitasandile vastavast halltoonide pildist. Joonisel 3.4 on näide nendest tasanditest ja nende vahest. Kuigi joonisel 3.3 keskmine viga väheneb n suurenemisel, siis alates $n = 4$ hakkab keskmise vea standardhälve suurenema. Joonise parempoolsel graafikul on kuvatud maksimaalne viga. $n = 3$ juhul on

viga suur, kuna polünoom lähendatakse vaid 64 alapiirkonna põhjal. Suurte alapiirkondadega on oht keskmistada üle kõrgemat järku struktuuride SLMi tegelikus faasikostes ning infot kostest kaotatakse. Juhul $n = 7$ on alapiirkonna suurus juba võrreldav üksikute pikslite suurusega ning viga on suur polünoomis tekkivate Runge efektide tõttu, kus faasimaski servades muutuvad ostsillatsioonid väga suureks. Joonise 3.3 põhjal valisin $2^{2.4} = 256$ alapiirkonda, kuna maksimaalne viga ja keskmise vea standardhälve olid sel juhul väikseimad. Järgnevad katsed ja joonised on tehtud sellise alapiirkondade arvuga.



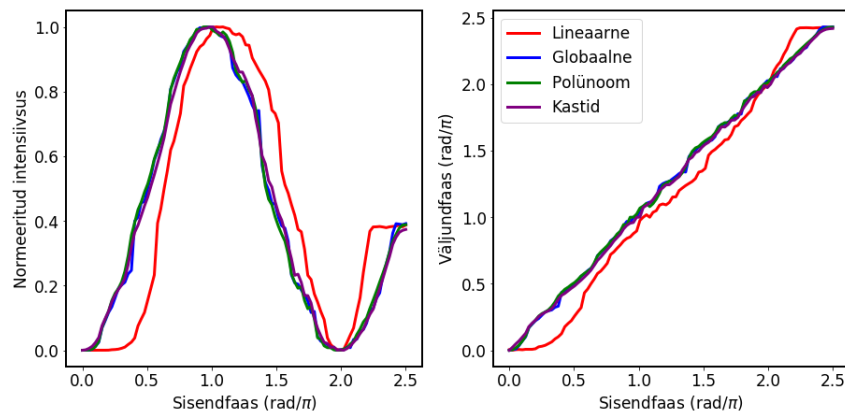
JOONIS 3.4: Mõõdetud faasitasandite ja polünoomi lähenduse võrdlus faaside π ja 2π jaoks. Ülemisel real on polünoomi hinnang faasitasandi halltoonide pildile, teisel real on alapiirkondadega esitatud tegelik halltoon selle faasi kuvamiseks ning kolmandal real on nende kahe pildi vahe, mis iseloomustab polünoomi viga halltooni määramisel.

Joonisel 3.4 on kahes tulbas faasitasandid faasi π ja faasi 2π jaoks. Teise rea piltidel on faasitasandile vastav halltoon määratud iga vaadeldava alapiirkonna faasikostest. Faasi π

määrates teeb polünoom suuremaid ja tihedamaid vigu kui faasi 2π määrates. Siin ilmneb ka SLMi ruumilise faasikoste keeruline struktuur, kus ühe faasi jaoks on selle faasimodulatsiooni saavutamiseks vajalik halltoonide pilt palju suurtemate ruumiliste sagedustega kui teise faasi jaoks. Kuigi polünoom taandab kaliibrimise ülesande lihtsale arvutusele, ilmnevad siin tema puudused. Polünoom on määratud saja erineva halltooniga paljudes alapiirkondades, ning polünoom peab suutma lähendada õiget sisendfaasile vastavat halltooni kõikidel nendel juhtudel. Seega ongi polünoom edukam madalamat järku struktuuriga faasitasandite määramisel. On võimalik polünoomi järku tõsta, kuid siis ilmnevad samuti Runge efektid ning tekivad suured vead pildi servades.

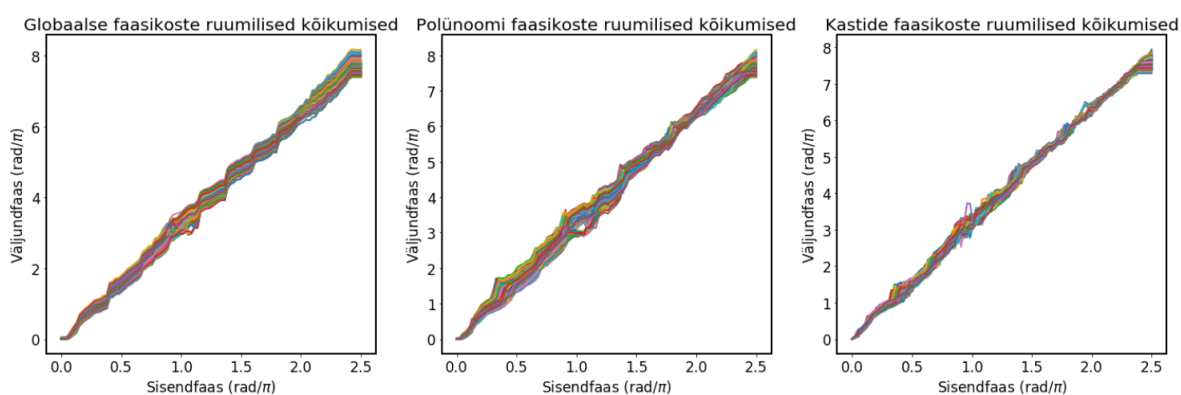
3.3 Teiskordne kaliibrimine

Teisel kaliibrimisel kasutame esimese kaliibrimisega sama skeemi, kuid halltooni ja faasinihke vastavuse määramise asemel pakub meile huvi leitud faasikostete edukus difraktsioonivõre faasimaski tekitamisel halltooni asemel sisendfaasi järgi. Kaliibrimise kvaliteet on määratud tema võimega tagastada sisendfaasile võimalikult lähedane väljundfaas.



JOONIS 3.5: Normeeritud intensiivsus ja faasikoste kolme kaliibrimisega. Lineaarne kaliibrimine ei kirjelda SLMi faasikostet nii hästi kui teised.

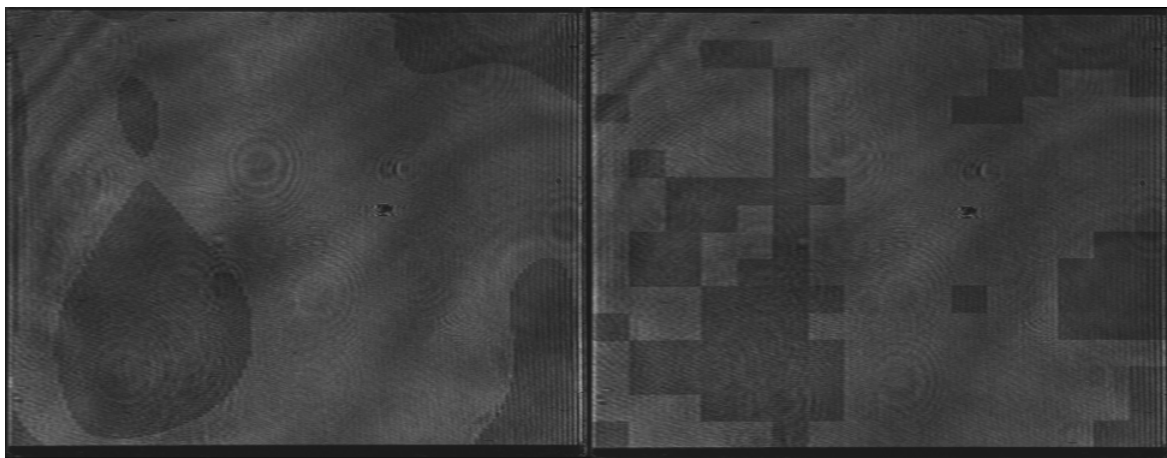
On näha, et kõik meetodid peale faasikoste lineaarse lähenduse näivad andvat ideaallähedast (joonis ??) intensiivsuskestet ja faasikostet. Kuuna joonisel 3.5 ei selgu hästi ruumilise faasikostega arvestamise eelised, jagasime teisel kaliibrimisel tehtud pildid uuesti alapiirkondadeks ja leidsime igas alapiirkonnas eraldi faasikoste.



JOONIS 3.6: Normeeritud intensiivsus ja faasikoste kolme kaliibrimisega.

Alampiirkondade faasikostete graafilisel kujutamisel peaksid nad eduka kaliibrimise korral võimalikult palju üksteisega kattuma. Joonisel 3.6 on nii globaalse kaliibrimise faasikosted kui ka polünoomiga kaliibrimise faasikosted laiali valgunud ning kastide kaliibrimisel on

faasikosted üksteisele rohkem sarnased. Kuigi globaalne faasikoste ei arvesta SLMi tegeliku faasikoste ruumilise sõltuvusega, on ta võrreldav polünoomile lähendamise meetodiga ja kohati edukam. Siin ilmneb meie SLMi omapära: tegeliku faasikoste kuju ei ole nii muutlik, et difraktsiooni efektiivsuse kaudu kaliibrides üle kogu SLMi intensiivsust keskmistades palju tulemust rikuks. Ruumilise faasikostega arvestamise eelis tuleb välja kastide faasikoste juures, mille alapiirkondade üksikud kosted on palju paremini koondunud. Kõigil kolmel graafikul on kõverate alguses märgatav hüpe umbes $0,4\pi$ radiaani juures, mis vastab eespool kirjeldatud järsule hüppele halltoonide vahemikus 60-70.

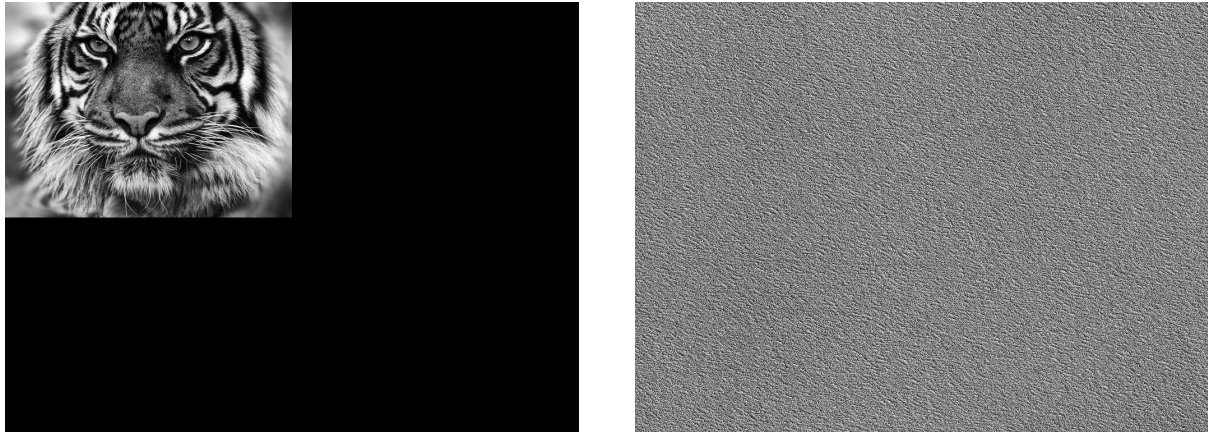


JOONIS 3.7: Järsud intensiivsuse muutused tulenevalt SLMi pingestusskeemi ebatäpsustest. Vasakul on polünoomiga kaliibritud difraktsioonivõre esimese järgu ruumiline esitus ja paremal on difraktsioonivõre kaliibritud kastidega.

Intensiivsuskoste järsu hüppe vahemiku efekte iseloomustab joonis 3.7, kus on kõrvuti paigutatud polünoomi ja kastide meetodil kaliibritud difraktsioonivõre esimese järgu ruumilise lahutuse pildid. On selgesti eristatavad kontrastsed alad, mida tekitab faasimaskide halltoonide paiknemine intensiivsuskoste järsu hüppe ligidal. Kuigi heledamatele ja tumedamatele aladele vastavad halltoonid on väga sarnased, on SLMi pingestusskeemi ebatäpsuste või vigade tõttu nendele halltoonidele vastav vedelkristallis tekkiv murdumisnäitaja väga erinev ning seega ka murdumisnäitajast tingitud faasinihe. Difraktsiooni efektiivsusega kaliibrides on need järsud faasinihe erinevused selgesti jälgitavad võre esimese järgu ruumilises esituses.

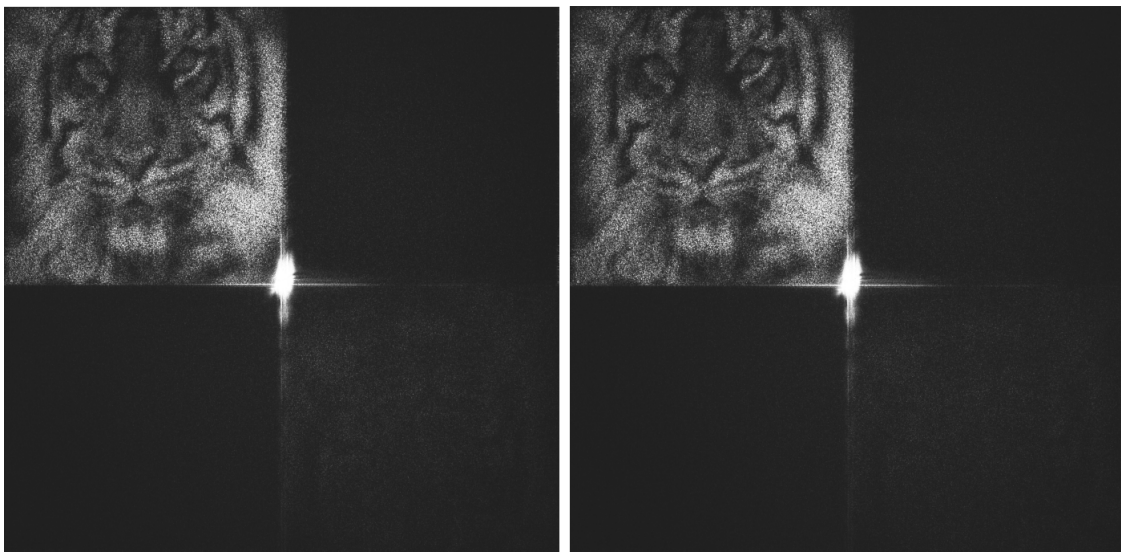
3.4 Faasihologrammide kuvamine

Hologrammide pildistamiseks oli üles seatud skeem 2.2. Viimase kaliibrimiste võrdlusena kuvame SLMile samast sihtpildist saadud faasihologramme, millel on rakendatud eespool kirjeldatud neli kaliibrimismeetodit, ning võrdleme sagedusesitusse tekkinud sihtpildi kujutise kvaliteeti nendel juhtudel.



JOONIS 3.8: Sihtpilt ja temale vastav Gerchberg-Saxtoni algoritmiga leitud faasimask.

Sihtpildis paikneb tiiger pildi esimeses veerandis selleks, et faasimaski alaliskomponent ei paikneks Fourier' tasandis tiigri pildi keskel. Lisaks võimaldab selline asetuse jälgida kui efektiivselt mingi kaliibrimine valgust ainult hologrammi esimesse järku suunab.



JOONIS 3.9: Faasihologrammide pildid Fourier' tasandis. Vasakul on lineaarse kaliibrimisega tehtud pilt ning paremal on polünoomi kaliibrimisega tehtud pilt.

Joonisel 3.9 on esitatud erinevate kaliibrimistega tehtud faasihologrammide kvalitatiivne võrdlus. Teiste kaliibrimistega tehtud faasihologramme me siin ei kuva, kuna nad on väga sarnased polünoomi faasihologrammile. Mõlema pildi keskel on hele faasihologrammi alaliskomponendi järk, mis on kaamera pildis küllastunud. Kui tiigri kujutist kutsuda faasihologrammi esimeseks järguks, siis kujutise suhtes vastandveerandis paiknev pilt on faasihologrammi -1 järk. Mida parem on kaliibrimistehnika, seda rohkem valgust on suunatud faasihologrammi esimesse järku ning seda tuhmim on kujutis -1 järgus. Faasihologrammi piltide rangemat analüütilist käsitlust piirab nendel piltidel speklimumstrite ilmumine Fourier' tasandis. Speklite mustrid tekivad, kuna SLM panustab peegelduva välja faasi ka juhusliku komponendiga ning Gerchberg-Saxtoni algoritm ise ei ole ideaalne. SLMi juhuslik panus tekib pikslite vahelisest alast, mille kohal muutub ka vedelkristalli murdumisnäitaja pinge rakendamisel pikslite elektroodidele. Seega liitub tekitada soovitatavale väljale juhuslik speklipilt, mille liitumist sihtpildiga me näeme Fourier' tasandis.

Kokkuvõte

SLMid on optoelektronilised seadmed, mis võimaldavad valguse amplituudi või faasi moduleerimist. Nad on levinud nii teadustöös kui ka erasektoris, näiteks holograafia rakendustes ja optilistes arvutites. SLMi täpne kasutamine faasimodulatsioonis eeldab tema faasikoste tundmist.

Töö eesmärgiks oli uut kaliibrimistehnikat kasutades määrata SLMi faasikoste suure ruumilise lahutusega. Tutvustasime originaalset meetodit, mis on võimeline ruumilise faasikoste määramiseks kiiremini kui interferomeetrit või integraalset andurit kasutavad tehnikad ning mis pakub suuremat paindlikust andmetöötles. Meetod kasutas kaamerat, et pildistada SLMi pinda difraktsiooni esimeses järgus. Tulemuste peatükis võrreldi kaliibrimistehnikaid, mis arvestavad või ei arvesta SLMi faasikoste ruumilise sõltuvusega ning demonstreeriti eeliseid ruumilise sõltuvusega arvestamisel. Esitati kvalitatiivne faasihologrammide võrdlus, kus selgus lineaarse kaliibrimise puudulikkus SLMi tegeliku faasikoste kirjeldamisel.

Edasiarendusena on võimalik faasihologramme arvutades arvestada intensiivsusjaotusega SLMil. SLMi valgustatus mõõdeti kaameraga kaliibrides ning sellega arvestamine tõstaks faasihologrammide teravust ja kontrasti. Lisaks on võimalik adresseeritava halltoonide ja tekkiva faasinihke määramisel kasutada kogu võimalikku halltoonide vahemikku 0-255, mis võib tõsta leitud faasikoste täpsust.

Siinkohal soovib autor tänada oma juhendajaid Sandhra-Mirella Valdmata ja Andreas Valdmanni, kes aitasid käesoleva töö teksti korrastamisel ning olid alati valmis sisuliseks aruteluks töö läbi viimise jooksul.

Kirjandus

- [1] Ori Katz, Eran Small, and Yaron Silberberg. Looking around corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light. *Nature Photonics*, 6: 549–553, 2012.
- [2] Tao Zhao, Juan Liu, Xinhui Duan, Qiankun Gao, Junyi Duan, Xin Li, Yongtian Wang, Weishu Wu, and Rongjun Zhang. Multi-region phase calibration of liquid crystal slm for holographic display. *Appl. Opt.*, 56(22):6168–6174, Aug 2017. doi: 10.1364/AO.56.006168. URL <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-56-22-6168>.
- [3] Stephan Reichelt. Spatially resolved phase-response calibration of liquid-crystal-based spatial light modulators. *Appl. Opt.*, 52(12):2610–2618, Apr 2013. doi: 10.1364/AO.52.002610. URL <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-52-12-2610>.
- [4] David Engström, Martin Persson, Jörgen Bengtsson, and Mattias Goksör. Calibration of spatial light modulators suffering from spatially varying phase response. *Opt. Express*, 21(13):16086–16103, Jul 2013. doi: 10.1364/OE.21.016086. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-21-13-16086>.
- [5] Spatial light modulator - holoeye photonics ag. URL <https://holoeye.com/spatial-light-modulators/>. Accessed: 2018-04-02.
- [6] Hamamatsu lcos. URL <https://www.hamamatsu.com/us/en/community/lcos/index.html>. Accessed: 2018-04-02.
- [7] L. Vicari. *Optical Applications of Liquid Crystals*. Series in Optics and Optoelectronics. Taylor and Francis, 1 edition, 2003. ISBN 0750308575,9780750308571,9781420033748.
- [8] Anthony C. Lowe(eds.) Ernst Lueder(auth.). *Liquid Crystal Displays: Addressing Schemes and Electro-Optical Effects, Second Edition*. 2010. ISBN 9780470745199,9780470688342.

-
- [9] Michael Hird Peter J. Collings. *Introduction to Liquid Crystals: Chemistry and Physics*. Liquid Crystals Book Series. CRC Press, 1997. ISBN 0748406433,9780748406432.
- [10] Jeffrey A. Davis, Ignacio Moreno, and Philbert Tsai. Polarization eigenstates for twisted-nematic liquid-crystal displays. *Applied Optics*, 41, 2002.
- [11] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier optics*. Roberts and Co., 3 edition, 2005. ISBN 0974707724.
- [12] P. Hariharan. *Basics of Interferometry*. Elsevier Academic Press, 2nd ed edition, 2007. ISBN 0123735890,9780123735898,0080465455,9780080465456.
- [13] Nobukazu Yoshikawa, Masahide Itoh, and Toyohiko Yatagai. Binary computer-generated holograms for security applications from a synthetic double-exposure method by electron-beam lithography. *Opt. Lett.*, 23(18):1483–1485, Sep 1998. doi: 10.1364/OL.23.001483. URL <http://ol.osa.org/abstract.cfm?URI=ol-23-18-1483>.
- [14] Optalysis. URL <https://www.optalysys.com/>. Accessed: 2018-05-31.
- [15] Graeme Whyte and Johannes Courtial. Experimental demonstration of holographic three-dimensional light shaping using a gerchberg–saxton algorithm. *New Journal of Physics*, 7(1):117, 2005. URL <http://stacks.iop.org/1367-2630/7/i=1/a=117>.
- [16] R.W. Gerchberg and Saxton W. O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 35:237–250, 11 1971.
- [17] Andmetöötuse klass. URL <https://gitlab.com/aramend/SLMcalib>. Accessed: 2018-05-29.
- [18] Meelis Kull. Lecture slides of 2018 spring semester machine learning course at tartu university, 2018.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Jaan Kasak,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Ruumilise valgusvälja modulaatori faasikoste määramine suure ruumilise lahutusega,

mille juhendajad on Andreas Valdmann ja Sandhira-Mirella Valdma,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, 31.05.2018